

Trabajo fin de grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis formal, modelado y recreación virtual del
Puente y Viaducto del Alamillo. Sevilla

Autora: Ester García Romero

Tutor: Manuel Morato Moreno

**Departamento de Ingeniería Gráfica.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo fin de grado
Grado en Ingeniería Civil

Análisis formal, modelado y recreación virtual del Puente y Viaducto del Alamillo. Sevilla

Autora:
Ester García Romero

Tutor:
Manuel Morato Moreno
Profesor titular de Escuela Universitaria

Departamento de Ingeniería Gráfica.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Trabajo fin de grado: Análisis formal, modelado y recreación virtual del Puente y Viaducto del Alamillo.
Sevilla

Autora: Ester García Romero

Tutor: Manuel Morato Moreno

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores y amigos

A mi tutor

Agradecimientos

Han pasado ya varios años desde que pisé la Escuela por primera vez. Entré llena de ilusión por empezar la carrera que quería y ahora salgo con más ganas de seguir estudiando y de trabajar.

Han sido unos años muy duros, desde el principio, pero me alegro mucho de haber elegido el camino que tomé, ya que no solo he estudiado lo que me gusta sino que además he adquirido madurez y he conocido a personas increíbles.

Por supuesto, debo de agradecer el incondicional apoyo de mis padres, que siempre han estado ahí fuera cual fuese el día y me han dado fuerzas para seguir. A mi hermana Marta, que siempre ha sido una fuente de inspiración para mí y a mis amigos cuyo apoyo también ha sido importante en estos años.

Agradezco también la ayuda de la Delegación Territorial de Fomento y Vivienda (Servicio de Carreteras), donde tan amablemente me atendieron y me proporcionaron el material que necesitaba.

También debo de agradecer profundamente la gran ayuda de mi tutor. No solo me ha guiado en cada paso en este trabajo, me ha atendido siempre que ha podido y ha respondido a mis correos a una velocidad increíble, sino que además me ha dado ánimos durante todo el cuatrimestre para seguir adelante. Jamás podría haber tenido un tutor mejor. También tengo que agradecerle su ayuda para imprimir en 3D los modelos, y a su compañero Don Antonio Pérez Romero.

Pienso que soy una afortunada por haber podido hacer este trabajo fin de grado. Cada vez que voy a la Escuela, veo grandes obras de Ingeniería civil desde el autobús como la Torre Pelli, el Estadio Olímpico y por supuesto el Viaducto y el Puente del Alamillo. Todas ellas siempre me recuerdan la grandeza de lo que estoy estudiando y son fuente de inspiración para mí.

Me voy de la escuela forjada como una nueva persona, con más ganas de seguir y sabiendo que con constancia, dedicación y perseverancia todo es posible.

.

Ester García Romero

Sevilla, 2017

En el presente trabajo se ha realizado la reconstrucción virtual del Puente y Viaducto del Alamillo, obras insignias de la Exposición Universal de Sevilla, la Expo '92.

En primer lugar se elaboraron los planos tanto del puente como del viaducto. Para ello se realizó una búsqueda de información tanto por internet como por bibliotecas, pero había muy poco material. Por ello, fui a Gerencia de Urbanismo, donde me dijeron que llamara al 010, atención al ciudadano del Ayuntamiento de Sevilla. Me proporcionaron el número de la Delegación Territorial de Fomento y Vivienda (Servicio de Carreteras) donde me atendieron muy amablemente y me proporcionaron bastante material para empezar el trabajo.

En ese material que conseguí, había numerosos planos (todos en papel) los cuales se escanearon, se insertaron en AutoCad y se dibujó encima con bastante dificultad ya que no eran de muy buena calidad.

Una vez obtenido los planos, se empezó a trabajar con Catia. Como he tenido que aprender desde cero, se modelizó en primer lugar el Viaducto del Alamillo ya que era más sencillo que el puente. Una vez finalizado el Viaducto se empezó con el Puente.

Para la construcción en 3D con Catia V5, se han elaborado elementos part. partes del viaducto y del puente que posteriormente se han ensamblado. Se ha definido su material y sus características por medio de dicho programa.

Los primeros tres apartados son de carácter descriptivo, en los que se incluye antecedenes históricos, la historia de Sevilla y su río, y una breve biografía de Santiago Calatrava Valls, autor de estas obras.

En el cuarto apartado se describe el Viaducto de la Cartuja, su geometría, materiales, modelización en Catia y su proceso constructivo.

Análogamente en el quinto apartado, se describe el Puente del Alamillo, su geometría, materiales, modelización en Catia y su proceso constructivo.

Para finalizar, se incluyen unas conclusiones sobre el trabajo realizado.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Índice	v
Introducción	1
1.1 Elección del tema	1
1.2 Herramienta CAD: Catia V5R18	2
Antecedentes históricos	4
2.1 La Exposición Iberoamericana de 1929	4
2.2.. La cuestión fluvial	7
2.3 .La cuestión ferroviaria.	11
2.4. Expo '92.	12
Santiago Calatrava Valls	21
3.1. Biografía	21
3.2 Obra	21
El Viaducto de la Cartuja	31
4.1 Descripción general	31
4.2 Modelado con Catia V5	32
4.2.1 Part 1. Tablero.	32
4.2.2 Part 2. Zona de apoyo.	36
4.2.3. Part 3. Pilares.	36
4.2.4. Assembly Design	38
4.3. Proceso de cálculo del viaducto.	43
4.4 Proceso constructivo	43
4.4.1 Pilas	43
4.4.2 Tablero	45
El Puente del Alamillo	49
5.1 Descripción general	49
5.2. Modelado con Catia V5	52
5.2.1 Part 1. Pilonos cuerpo y cabeza	52
5.2.2 Part 2. Encepado	59
5.2.3 Part 3. Basamento.	61
5.2.4. Part 4. Unión pilono con basamento.	65
5.2.5 Part 5. Tablero I. Viga hexagonal y tablero recto.	68
5.2.6 Part 6. Tableros curvos	70
5.2.7 Part 7. Tirantes.	71
5.2.8 Part 8. Costillas: vigas transversales.	73
5.2.9 Part 9 y 10. Lecho y agua	75
5.2.10 Assembly Design. Puente ensamblado.CATProduct	76
5.3. Proceso constructivo	83

5.3.1 Tablero	83
5.3.2 Mástil	85
5.3.3. Tirantes	87
Conclusiones	90
Bibliografía	92
Índice de figuras	98
Lista de planos	104

Introducción

1.1 Elección del tema

Sevilla es una ciudad excepcional en cuanto a patrimonio histórico y cultural. Podemos encontrar en ella arquitectura renacentista, barroca y por supuesto mudéjar. Muchos edificios son representantes de todas las civilizaciones que han habitado en esta ciudad.

A partir del siglo XX, Sevilla comienza a modernizarse, primero gracias a la Exposición Iberoamericana de 1929 y más tarde gracias a la Exposición Universal de 1992.

Yo no había nacido cuando se celebró la Exposición Universal de 1992, que este año conmemora su 25 aniversario. Su huella está muy presente en esta ciudad, fue clave para la modernización de Sevilla: la construcción del AVE Sevilla-Madrid, los puentes que terminaron de unir una parte de Sevilla con la otra y por supuesto el parque tecnológico de la Cartuja donde mi propia Escuela tiene sede en el que fuera el Pabellón de África.

Yo he nacido y he crecido en Sevilla. He ido multitud de veces con mi familia a la Cartuja, a Isla Mágica, al Pabellón de la Navegación etc cuando era pequeña y con mis amigos al Parque del Alamillo. Probablemente la Cartuja y toda su arquitectura han marcado una huella en mí, y sea por ello por lo que elegí la carrera que estudio. Desde que estaba en el instituto hasta el día de hoy he visto la construcción de la Torre Pelli paso a paso, cada vez que iba al Jardín Americano o al Parque del Alamillo en bicicleta me quedaba sin palabras al pasar por los edificios de la Expo o por el Puente del Alamillo.

La realización de este trabajo de fin de grado ha sido un privilegio para mí. Tuve la ocasión de utilizar una vez un programa 3D en una asignatura, SketchUp, y me quedé con ganas de aprender más a modelar en 3D. Desde luego los detalles y la forma de dimensionar con Catia no se pueden comparar con el programa que había usado antes.

Por el hecho de haber podido aprender a dimensionar en 3D con Catia, y además que hayan sido dos estructuras tan importantes de Sevilla que tan presentes han estado en mi vida, ha sido un verdadero honor para mí.

1.2 Herramienta CAD: Catia V5R18

Se denomina “software CAD” (Computer Aided Design) a aquellos programas informáticos cuya función es el diseño asistido por ordenador. Los programas “software CAM” (Computer Aided Mecanization) son aquellos que ofrecen mecanizado asistido por ordenador. Ambos softwares permiten una capacidad de diseño, visualización y control de fabricación muy valiosa para ingenieros y diseñadores en una amplia variedad de industrias ya que estos programas permiten confeccionar productos tan dispares como puentes, edificios, barcos, coches, piezas complejas etcétera.

Las empresas más relevantes a día de hoy en el desarrollo de software CAD/CAM son Dassault System con Catia y SolidWorks, Parametric Technology con ProEngineer, Siemens con Unigraphics NX, Autodesk con Autocad y EDS/Intergraph y SDRC.

Estudiando el grado, solo aprendí a manejar AutoCad. El empleo y aprendizaje de Catia en este trabajo ha sido decisión mía. La mayoría de mis compañeros, incluso yo misma, pensábamos que Catia solo se empleaba para el dimensionamiento de piezas de motores o de aviones, es decir, solo para los ingenieros aeronáuticos o los ingenieros industriales. Pero esto no es cierto, con Catia se puede dimensionar puentes, viaductos, edificios, un sinfín de posibilidades.

Hay multitud de obras de ingeniería civil que han sido modeladas con este software. Un ejemplo de ello es el Estadio Olímpico de Pekín, conocido como El Nido del Pájaro (Bird's nest)

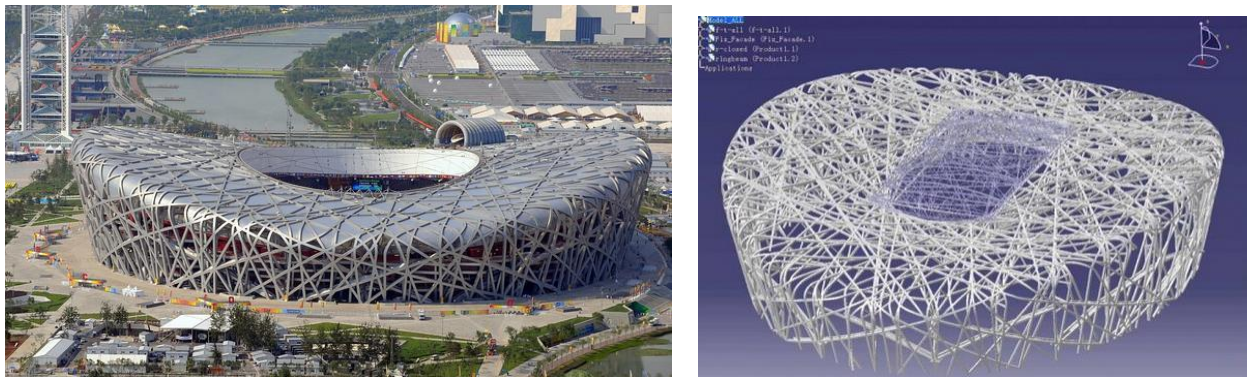


Figura 1.1 Estadio Olímpico de Pekín, en la realidad y modelizado en Catia.

Incluso se han realizado algunos trabajos en las obras de la Sagrada Familia en Barcelona con Catia, por ejemplo para dimensionar algunos pilares de granito:

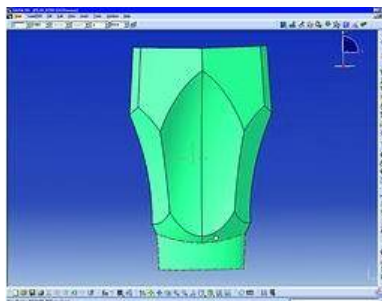


Figura 1.2. Pilar de la Sagrada Familia, Barcelona modelizado con Catia.

El hecho de poder asignar materiales y realizar análisis y simulaciones, que con otros programas como AutoCad 3D no es posible, entre otros aspectos, hace que Catia tenga cada vez más peso en el campo de la ingeniería civil y abra puertas a aquellos que sepan manejarlo.

Antecedentes históricos

La relación de Sevilla con el río Guadalquivir ha sido siempre una relación de amor y odio pero determinante para la evolución de la estructura urbana de la ciudad.

Esta relación surge de las características del Guadalquivir, que es un río de régimen muy irregular (lo que ha provocado inundaciones catastróficas) pero también ofrece un cauce navegable desde el océano. Esto favoreció la transformación de Sevilla en una de las principales ciudades europeas del siglo XVI.

Pocas ciudades han realizado tal cantidad de cambios en su cauce fluvial, tanto en el río principal como en los tributarios que desembocan en su entorno (varios arroyos y el río Guadaíra). Las causas han sido diversas, desde la defensa frente a las riadas hasta la mejora de su navegabilidad. Y Sevilla cambia cuando lo hace su río, ya que muchas de esas modificaciones han estado estrechamente vinculadas a las grandes transformaciones de la ciudad.

Las primeras obras comienzan en la Sevilla romana y continúan durante la etapa musulmana cuando se desecó el brazo secundario del río.

Sin embargo, es en el siglo XVIII, el siglo de la Ilustración, cuando se construyen las primeras grandes obras hidráulicas, como el murallón de la calle Betis o el malecón que protegía la zona de El Arenal.

A lo largo del siglo XX, la ciudad cambiará rotundamente su fisonomía con un conjunto de obras hidráulicas entre las que destacamos en primer lugar las que se realizaron para la Exposición Iberoamericana de 1929.

2.1 La Exposición Iberoamericana de 1929

Cuando en 1981 el gobierno español decide celebrar el V Centenario del Descubrimiento de América con una Exposición Universal, y señala Sevilla como la ciudad apropiada para la misma, no solo hace un acto de justicia con la ciudad que fue base de la colonización y de la evangelización del nuevo continente, sino que sitúa a Sevilla en condiciones de injertar en la problemática del acontecimiento su propia problemática como ciudad moderna.

Se repite así, una situación similar a la de la Exposición Iberoamericana de 1929. Entonces no solo se organizó una amplia cita de las veinte naciones que dejó en nuestra ciudad una huella perdurable de pabellones, plazas y jardines que embellecieron Sevilla para siempre sino que además forzó la solución del problema de diseño de la ciudad que empezaba a constituir una rémora en el desarrollo de la misma.



Figura 2.1 Mapa Exposición Iberoamericana de 1929

Los ensanches en torno a la Catedral y el Archivo de Indias propiciaron la creación de la amplia avenida que une el centro histórico con la Puerta de Jerez, que fue remodelada y comunicada ampliamente con los paseos de las Delicias y de la Palmera, de nuevo trazado. Asimismo Forestier convirtió el bosque donado a la ciudad por los duques de Montpensier, juntamente con el palacio de San Telmo, en el hoy univesalmente famoso Parque de María Luisa. En este marco se construyeron edificios monumentales como la Plaza de España, los tres pabellones de la Plaza de América y un gran número de construcciones como los pabellones de Brasil, Perú, Chile, Marruecos, Cuba, Guatemala, México y Argentina, en donde hoy se ubican servicios municipales, provinciales, estatales y universitarios.



Figura 2.2 Plaza de España 1929



Figura 2.3 Pabellón de Brasil 1929.

A estas construcciones, se añadieron monumentos de significación histórica o artística como el de Bécquer en torno a uno de los *taxodium* más famosos del mundo, las glorietas de los Hermanos Álvarez Quintero, Mas y Prat, Manuel y Antonio Machado, Ofelia Ochoa y muchos ilustres hijos de España y especialmente de Sevilla, mereciendo especial mención el conjunto del Casino y Teatro Lope de Vega.



Figura 2.4 Glorieta de Bécquer



Figura 2.5. Casino de la exposición 1929

2.2.. La cuestión fluvial

Sin duda la Exposición Iberoamericana dejó pendiente las cuentas entre Sevilla y su río. Poco antes de su inauguración se había mejorado su puerto, que venía sufriendo la decadencia desde que en el siglo XVIII la Corona decidiera trasladar a Cádiz la Casa de la Contratación que los Reyes Católicos instituyeron en los Reales Alcázares en 1503. Esa decisión se debió en gran parte, a la invención del barco a vapor que dio paso a tonelajes que difícilmente podían remontar un cauce de escaso calado cuya entrada se obstruía frecuentemente por los sedimentos arenosos que depositaban las mareas a la altura de Bonanza (Sanlúcar de Barrameda)

Tampoco favorecía a la navegación la existencia de numerosos meandros que dificultaban los movimientos de los buques, y que desde tiempo casi inmemorial venían sufriendo importantes obras de rectificación del curso, que culminaron con la corta de Tablada realizada en los años veinte. Con todo, no se afrontó un problema dramático que gravitaba sobre la ciudad: el de las avenidas. La falta de embalses suficientes para retener el agua y utilizarla después como medio de generación eléctrica y de regadío para unas tierras fértiles frecuentemente asolada por la sequía, planteaban a una Sevilla moderna –tal como quedó con el esfuerzo culminado en 1929- la necesidad de liberarse del azote de las inundaciones que casi siempre tenían lugar en los inviernos.

La estampa de la Alameda de Hércules convertida en un lago, así como la totalidad de la vega y gran parte del barrio de Triana bajo las aguas, concienció a los dirigentes a asumir al mismo tiempo que el dragado del río, para mantener despejado el acceso al puerto fluvial mas importante del país, el de emprender obras de suma importancia para evitar las riadas.



Figura 2.6. Riada calle Castilla, Triana

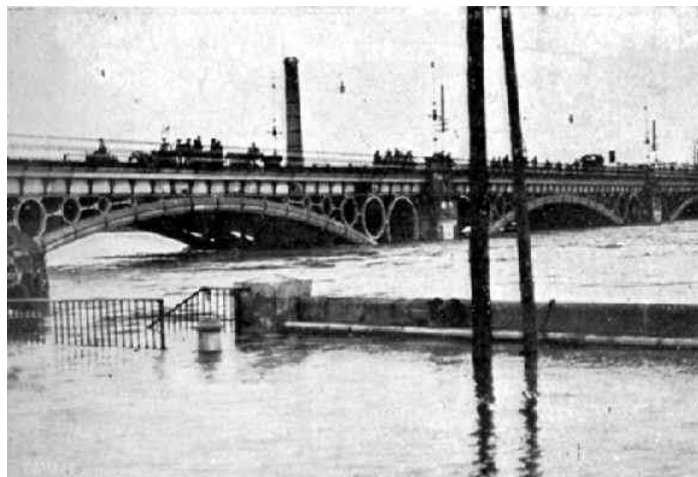


Figura 2.7. Riada Puente de Triana.

La urgente necesidad de alejar el peligro propició desde los años veinte la realización de un nuevo cauce por la vega y el establecimiento de un muro de defensa. Ambas obras alzaron su cima a principios de los años cuarenta.

Era necesario, además, preservar el propio puerto de los efectos devastadores de las avenidas, cosa que no se impedía con el nuevo curso, llamado solo a aumentar la capacidad de desagüe. La única manera de preservar el puerto de las avenidas era crear la dársena, cerrándola al fondo con un fuerte istmo artificial —que se situó en Chapina— y evitar el refluo de las aguas, por las entradas, con una esclusa en la Punta del Verde. Ambas obras se realizaron en los años cuarenta. Pero así como la creación de la esclusa no produjo la menor preocupación a lo sevillanos, el corte del río por Chapina, se recibió como un agravio, a pesar de que preservaba de males graves y periódicos. Sintieron los sevillanos como si se les separara de su río.



Figura 2.8. Tapón de Chapina.

Este sentimiento tuvo eco en la prensa y en las manifestaciones públicas por lo que el gobierno de la nación acometió la tarea de alejar el tapón del río a las afueras con una desviación del río, que neutralizó el llamado meandro de Los Jerónimos, y dio origen a la isla de la Cartuja, viejo monasterio sometido a la protección del ducado de Veragua otorgado por Carlos I a la familia de Cristóbal Colón, el cual estuvo enterrado en el mismo. Hay estudios que afirman que los restos no llegaron nunca a salir del Monasterio para América.

La obra desamortizadora de Mendizábal había permitido que La Cartuja fuese adquirida por la familia Pickman, artesanos ingleses de la cerámica, que llegaron a ser galardonados con el marquesado de su apellido, en razón a la importancia y la fama que adquirió su industria y de los excelentes productos que lanzaron al mercado. Las enormes chimeneas con forma de botella, que dan escolta a la fábrica clásica del Monasterio, son el último y elegante testimonio de esta actividad industrial y comercial, que hoy se desarrolla en otro emplazamiento.



Figura 2.9. Monasterio de la Cartuja siglo XX

Los nuevos cursos del río y la Isla de la Cartuja, cuyos terrenos fueron objeto de expropiación a favor del Estado en los primeros años setenta, plateaban a Sevilla una doble problemática. Una, la de resolver mediante un sistema de puentes las comunicaciones con una parte importantísima de la provincia –el Aljarafe– y con las provincias de Huelva, Cádiz y Badajoz. La segunda dar a la ciudad una imagen de urbe del siglo XX.

La Expo y el sistema viario han cumplido, con motivo de la celebración del V Centenario del Descubrimiento de América, los dos objetivos, con el aliciente añadido, no buscado, de centrar ambas soluciones en torno a un Monasterio que debe su origen al Descubridor de América.

Ya al hilo de la Exposición de 1929, se habían multiplicado los pasos sobre el río. Dos puentes, el de la Corta, denominado de Alfonso XIII, y el de San Telmo, ambos elevadizos, estaban concebidos para que el puerto siguiese centrado en la Torre del Oro, en los mismos muelles que sirvieron para el servicio a América. Pronto los muelles siguieron avanzando por la margen izquierda, en donde, sin duda, se encontraba la verdadera solución del puerto. Con el tiempo, tanto el puente de San Telmo como el de Alfonso XIII cumplían muy difícilmente su función permitiendo circular bajo sus tableros solo embarcaciones de escaso tonelaje.

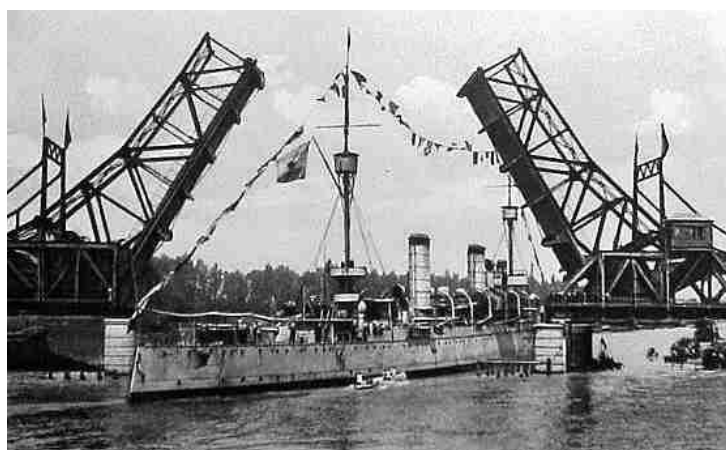


Figura 2.10. Puente de Alfonso XIII, 6 de Abril de 1926



Figura 2.11. Puente de San Telmo

Por los años setenta, el tablero del puente de San Telmo se inmovilizó para siempre y quedó para actividades lúdicas y culturales el espacio que media entre el mismo y el Puente de Isabel II, erigido con un diseño francés de círculos y arcos metálicos y que sustituyó al puente de barcas. Este puente no solo ha jugado un papel decisivo en la comunicación entre Sevilla y Triana, sino que también ha sido y es, motivo estético de primera magnitud.



Figura 2.12. Puente del Carrousel, París.



Figura 2.13. Puente de Triana.

En los años sesenta, igualmente, y decidido el destino del viejo puerto, se construye el puente del Generalísimo, actualmente conocido como Puente de Los Remedios.



Figura 2.14. Puente de Los Remedios

2.3 .La cuestión ferroviaria.

Después de la gran transformación que experimenta Sevilla en 1929, se empieza a notar que el futuro de la ciudad estaba hipotecado por la presencia del ferrocarril, que como un dogal la aprisiona. Por un lado, estaba la línea Madrid-Cádiz que partía la ciudad en dos, por otro la penetración del ferrocarril Madrid-Sevilla a lo largo del río hasta la llamada Estación de Córdoba, en la vieja Plaza de Armas. Eliminada, en gran parte, la derivación hacia Cádiz hace una docena de años, se requería completar esta obra haciendo dicha línea subterránea y suprimiendo los puentes urbanos.



Figura 2.15. Antigua estación de Córdoba.

La operación urbanística más importante era la supresión de la penetración hasta la Plaza de Armas, que prácticamente tenía secuestrado el río, a los ojos de los sevillanos, con una zona amplísima cerrada por un muro que corría a todo lo largo de la calle Torneo. Los sevillanos le llamaban ya su particular muro de Berlín, y su demolición en el año 1992 significó la conquista de una perspectiva bellísima, cara al Aljarafe, palabra de origen árabe que significa “lo que está más alto”, en lontananza, y cara a la isla de la Cartuja, de manera más próxima. Los sevillanos ganaban así una nueva extensión del río de aproximadamente cinco kilómetros, sobre el viejo meandro de San Jerónimo, con enormes posibilidades culturales, urbanísticas, lúdicas y deportivas.

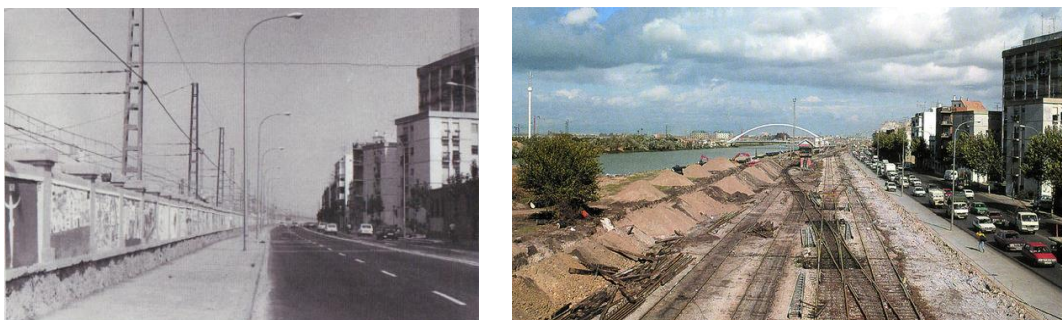


Figura 2.16. Muro de torneo y su demolición.

Base principal para el cumplimiento de estos objetivos eran los cuatro puentes a construir en esta zona: el puente de Chapina, el de la Barqueta, el de La Cartuja, y, finalmente, el Puente del Alamillo, que verían la luz en la Expo'92.

2.4. Expo '92.

No es hasta el año 1992 con la eliminación del istmo de Chapina y el muro de Torneo, que se consolida al fin el cauce final del río. El Guadalquivir a su paso por Sevilla ve su imagen final tras años de cambios y reformas.



Figura 2.17. Evolución del río Guadalquivir, desde el siglo XIX hasta 1992.

La construcción de seis grandes puentes sobre la Dársena del Guadalquivir puso punto final a la consolidación del paso del Guadalquivir por Sevilla hasta el día de hoy. Al sur se contruyeron El Puente del V Centenario y el Puente de las Delicias, que sustituyó al obsoleto Puente de Alfonso XIII. Al Norte, se construyeron cuatro nuevos puentes, todos ellos exentos de apoyo sobre la hermosa lámina de agua: Puente del Cristo de la Expiración, la Pasarela de la Cartuja, el Puente de la Barqueta y el impresionante Puente del Alamillo.

Estos cuatro puentes contruidos en la parte norte de la ciudad, permitieron liberar al río, literalmente secuestrado por una anticuada red ferroviaria, ahora sustituida brillantemente por la estación de Santa Justa.

El Puente del V Centenario

El Puente del V Centenario es un puente atirantado que permite cruzar por la ronda SE-30 sobre el río Guadalquivir. Fue diseñado por José Antonio Fernández Ordóñez y Julio Martínez Calzón. Su inauguración tuvo lugar en el 15 de noviembre de 1991 y por aquél entonces fue el puente atirantado más largo de España.

Esta formado por dos torres de 120 metros de altura, con un vano de 265 m de longitud entre los pilares por donde discurre el tablero, situado a una altura máxima de 45 m sobre el Gualdaquivir para permitir el paso de barcos. Cada torre está constituida por dos pilares verticales unidos en la parte superior y justo debajo del tablero el puente tiene dos planos de atirantamiento, con tirantes que convergen en la parte superior.

A pesar de la espectacularidad y modernidad de la obra, supone uno de los puntos negros de la SE-30 debido en gran medida al estrechamiento de la carretera de tres carriles a otra de dos bastante estrechos, más otro carril reversible que se consiguió a costa de eliminar los arceles.



Figura 2.18. Puente del V Centenario.

El Puente de las Delicias.

Se contruye en el año 1992 un puente que sustituye al antiguo puente de Alfonso XIII, construido para la Exposición Iberoamericana de 1929, fiel exponente de la arquitectura del hierro, y que aún hoy se mantiene retirado en una explanada próxima en los terrenos del puerto de Sevilla.

Fue diseñado por los ingenieros de caminos españoles Leonardo Fernández Troyano y Javier Materola Armisen.

Se trata de un doble puente móvil con dos tableros levadizos independientes, uno para el tráfico rodado de automóviles y otro para el tráfico férreo de mercancías, de modo que posibiliten el tránsito de embarcaciones

hacia el puerto.

Los tableros van apoyados sobre dos grandes pilares centrales en forma de barca, que son huecos y en cuyo interior se aloja toda la maquinaria necesaria para el accionamiento.



Figura 2.19. Puente de las Delicias.

Puente del Cristo de la Expiración

Se le bautizó con este nombre debido a la proximidad de la capilla del Patrocinio, sede de la célebre imagen del Santísimo Cristo de la Expiración, conocido como “El Cachorro”.

Este puente comunica la carretera de Huelva y de Extremadura con la zona de Plaza de Armas y fue construido en el año 1991 por el ingeniero sevillano José Luis Manzanares Japón. Con su construcción se recuperó el cauce tradicional del río a través de la ciudad de Sevilla. Se eleva sobre el espacio en el que se situaba el tapón de Chapina y donde antiguamente se emplazaba la Pasadera del Agua llamada popularmente Puente de Tablas.

Su forma se inspira en el Puente de Alejandro III de París. Tiene una estructura de acero con dos arcos rebajados de 126 metros de luz y sin soporte bajo el agua. Esta estructura sostiene un tablero de 31.5 m de ancho y 225 m de longitud.

Sus aceras peatonales están cubiertas por lonas a modo de toldos que cuelgan de mástiles a lo largo del puente, proporcionando así una protección de los rayos del sol.



Figura 2.20. Puente del Cristo de la Expiración.

La Pasarela de la Cartuja

Diseñada por los arquitectos Fritz Leonhardt y Luis Viñuelas, conecta la Isla de la Cartuja con el Casco Histórico de la ciudad de Sevilla. Fue récord mundial por salvar una distancia de 170 m un único tablero central.

El puente se compone de un tablero de acero de gran esbeltez y morfología “aparentemente” simple cuyo diseño intentaba no restar protagonismo a su entorno, dada su proximidad al Monasterio de Santa María de las Cuevas.



Figura 2.21. Pasarela de la Cartuja.

El Puente de la Barqueta

Este puente, que fue diseñado por los ingenieros Juan José Arenas de Pablo y Marcos Jesús Pantaleón Prieto, se construyó entre 1989 y 1992.

Se compone de un arco de acero de 214 metros cuyos extremos forman un pórtico triangular a cada lado, atirantado por el propio tablero que tiene una longitud de 168 m. Sus únicos apoyos son cuatro soportes verticales a una distancia de 30 m sobre las orillas del río sin más apoyos intermedios. Su construcción fue bastante curiosa. Se realizó en tierra para posteriormente girarlo con la ayuda de barcazas hasta su emplazamiento final.



Figura 2.22. Puente de la Barqueta.

El Puente y Viaducto del Alamillo.

El último puente de los enumerados y en el que se centra este trabajo, hay que entenderlo como parte del paso territorial Camas-San Lázaro que se desarrolla en su totalidad sobre la isla de La Cartuja.

Este puente tenía una idea originaria muy diferente a la actual. El entonces consejero andaluz de Obras Públicas, el arquitecto Jaime Montaner, convocó un concurso de ideas restringido para resolver este paso con cierto atractivo escenográfico. Santiago Calatrava fue el elegido.

Su propuesta original era la de construir dos puentes simétricos a cada lado de la isla con un viaducto que los conectara, para salvar los dos brazos del Guadalquivir que rodean la isla de la Cartuja, con los dos pilonos enfrentados. Un puente semejante pero en dirección opuesta sobre el tramo que actualmente ocupa el Puente de la Corta. Serviría, en su boceto original, como telón de fondo de la Exposición Universal de 1992.

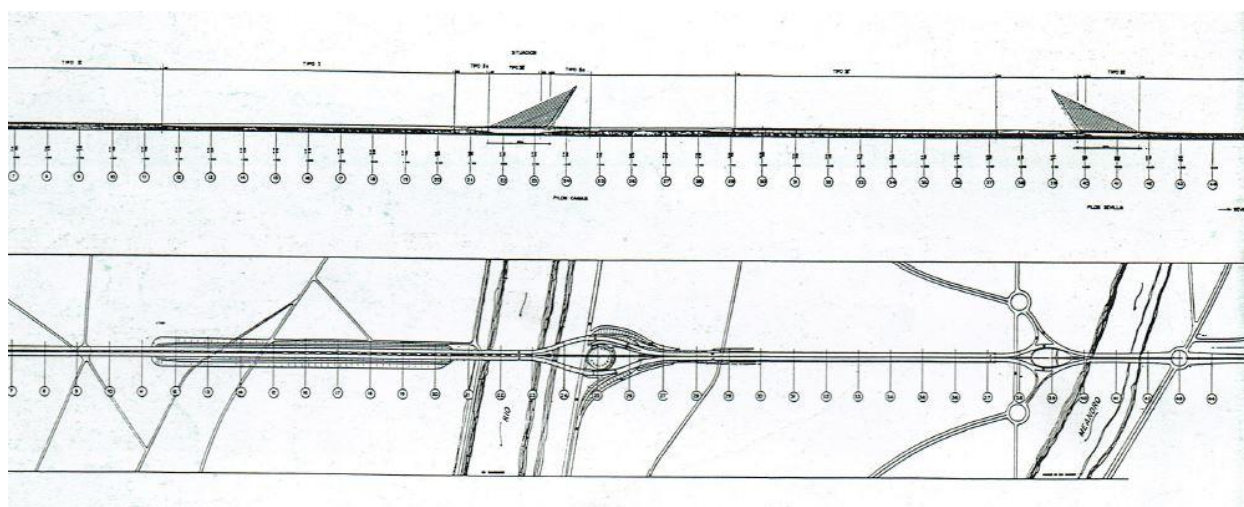


Figura 2.23. Modelo inicial del Proyecto.

El puente, siguiendo el diseño y el material que Calatrava había plasmado en sus planos, se comenzó a construir excesivamente tarde, pasándose a realizar un proyecto concebido para tres años en menos de uno.

El presupuesto ascendió de los 18 millones de euros inicialmente estimados hasta los 48 millones por lo que finalmente no se construyó el segundo puente gemelo. A pesar de ello, y tras sufrir apenas tres meses antes un incendio que afectó a tres de los cables de sujeción, el Puente del Alamillo fue inaugurado el 29 de Febrero de 1992.

Este paso territorial quedó finalmente resuelto mediante el desarrollo de dos grandes estructuras en las que se mezclan tipologías absolutamente diferentes; se propone la construcción de un viaducto de 526 metros de longitud con tres zonas diferenciadas en distintos niveles; una, paso de vehículos, otra para pasarelas peatonales, y una última que es la conformación de un espacio urbano inferior en la bóveda creada por la estructura, que se desarrolla a nivel del suelo y en cuyo volumen se ha previsto un uso cultural del mismo, adecuándose esta gran superficie para el establecimiento de exposiciones al aire libre, que bajo una iluminación natural a través de los huecos cenitales y laterales consiguen un efecto estético muy notable. En esta solución se adopta una fórmula poco impactante al limitar el gálibo y el plano superior por los viajes inferiores y se desarrolla a una altura que no obstaculiza la visión de la Exposición Universal en ningún punto, generando un nexo de unión entre los aparcamientos de autobuses de esta y la puerta oeste, para el paso de millones de personas bajo esta bóveda espectacular.



Figura 2.24. Viaducto del Alamillo.

Entre esta estructura y la que sirve de conexión con Sevilla, el puente atirantado, se desarrolla la obra mediante un terraplén y dos estructuras resueltas en losa pretensada que permite el paso de una de las calles del viario de la Isla, para a continuación entrar en otra estructura singular, el puente atirantado.



Figura 2.25. Unión Puente del Alamillo con Viaducto.



Figura 2.26. Estructuras que permite el paso desde el Puente del Alamillo al Viaducto.

El Puente del Alamillo, se consolidó como un símbolo de la Exposición Universal y un nuevo monumento digno de la ciudad de Sevilla.



Figura 2.27. Puente del Alamillo

Así se desarrolla una solución en la que los peatones circulan en un plano superior al de los vehículos rodados y por el centro del puente, creando un paseo espectacular entre los tirantes, resolviéndose la conexión de vehículos mediante dos ménsulas en las que discurren tres carriles para cada sentido. Más adelante se hablará de los detalles geométricos y constructivos tanto del puente como del viaducto y su modelización en Catia v5.

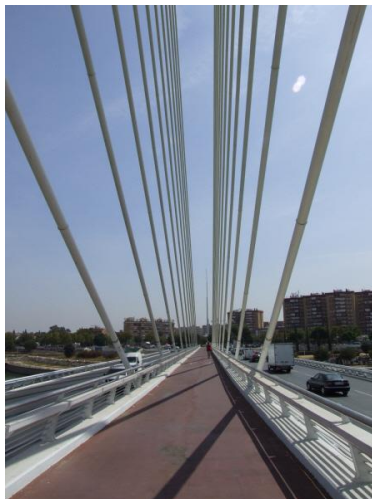


Figura 2.28. Puente del Alamillo, vista desde la zona peatonal.

Se crea, además, una plataforma superior, que es actualmente el segundo punto más elevado de nuestra ciudad, solo por detrás de la Torre Sevilla.



Figura 2.29. Zona mirador desde el Puente.

Desde el punto de vista cultural, el Paso del Alamillo supone un enriquecimiento de la arquitectura de Sevilla. Por este proyecto ha sido nombrado Doctor Honoris Causa por la Universidad de Sevilla D. Santiago Calatrava Valls, a propuesta de la Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla.

SANTIAGO CALATRAVA VALLS

3.1. Biografía

Santiago Calatrava i Valls nació en Benimamet, Valencia, el 28 de julio de 1951 y está considerado uno de los diseñadores contemporáneos con mayor reconocimiento a nivel mundial.

Ya en los años 1959 y 1960, asistió a clases en la Escuela de Bellas Artes y Oficios de Burjassot, donde se interesó por el dibujo. Al ser hijo de una familia valenciana dedicada tradicionalmente a la comercialización de cítricos, tuvo la oportunidad de viajar a París con trece años. Entre 1968 y 1969 continuó sus estudios de Bellas Artes en Valencia. Desde su juventud y hasta nuestros días ha sido conocida su pasión por las acuarelas y los grafitos, a través de los cuales expresa sus impresiones, ideas y proyectos.

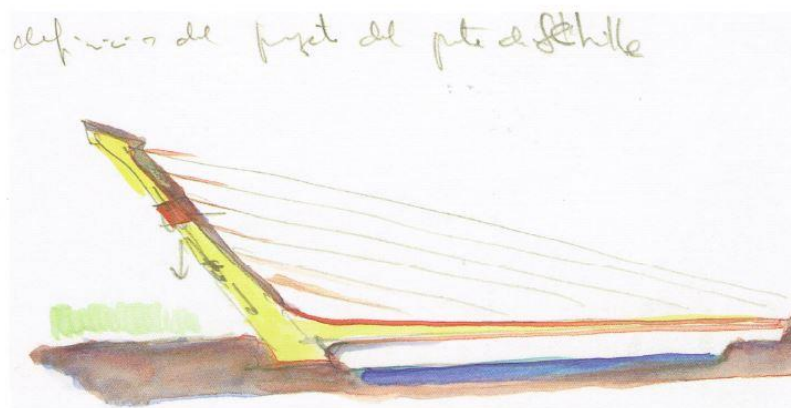


Figura 3.1. Boceto preliminar del Puente del Alamillo, Santiago Calatrava.

En el año 1969 comenzó sus estudios de Arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia, donde se graduó en 1974 y realizó un curso de posgrado en urbanismo. Durante su paso por la universidad llevó a cabo proyectos independientes con un grupo de compañeros, llegando a publicar dos libros sobre la arquitectura típica de Valencia e Ibiza.

Entre los años 1975 y 1979 estudió Ingeniería civil en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zúrich, y entre 1979 y 1981 se doctoró, en este centro, en Ciencias Técnicas con su tesis *Acerca de la plegabilidad de las estructuras*. En 1981 abrió su primer estudio de arquitectura e ingeniería civil en Zúrich.

3.2 Obra

Desde sus comienzos, Santiago Calatrava se ha caracterizado por su universalidad en el planteamiento de proyectos varios, como edificios, puentes, diseño de mobiliario urbano, entre otros, donde las formas múltiples se conjugan con el objetivo de conseguir un único resultado: una verdadera obra de arte. Para esto ha utilizado analogías de la naturaleza, que transforma y convierte en temas complejos en una respuesta llena de simplicidad creativa.



Figura 3.2. Boceto preliminar y obra L'Hemisfèric, Ciudad de las Artes y las Ciencias, Valencia.

Forma, estructura y movimiento son palabras claves en las obras de Calatrava, a quien algunos críticos relacionan abiertamente con el arquitecto catalán Antonio Gaudí, quien, al igual que hace Calatrava, se basaba en la observación de formas, estructuras y movimientos de la naturaleza para plasmarlos en sus diseños, que dieron a la humanidad las más finas y elaboradas obras de la arquitectura de principios del siglo XX. El arquitecto catalán Josep Maria Jujol inventó un revestimiento para cubiertas y acabados de superficies y muros conocido como *trencadís*, una especie de mosaico realizado con pequeños fragmentos cerámicos, unidos con argamasa. Este arquitecto estuvo fuertemente ligado a Gaudí. En la gran mayoría de los proyectos de ambos se encuentran detalles estéticos con esta técnica, que Calatrava recupera para sus obras en el revestimiento de algunos detalles y cubiertas.

La diferencia entre ambos, en lo referente a esta técnica, es que Gaudí utilizaba colores muy vivos en sus trabajos, mientras que Calatrava es proclive a emplear el blanco impoluto, aunque tampoco descarta el color.

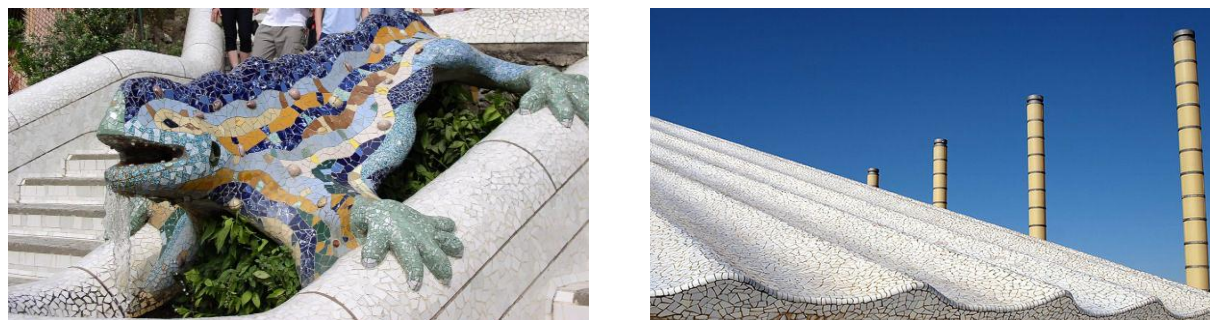


Figura 3.3. “Trencadís”. Izquierda Salamandra Parque Güell, Antonio Gaudí. Derecha Torre de Comunicaciones de Montjuic, Santiago Calatrava.

La arquitectura de Santiago Calatrava, se ha caracterizado entre otros aspectos, por sus inconfundibles puentes, una marca mundial en el campo de la ingeniería. Calatrava ha desarrollado proyectos de gran envergadura, de una complejidad plástica, volumétrica y constructiva sin precedentes.

Los puentes como esculturas descolgadas que trascienden, en todos y cada uno de los lugares donde están ubicados, por su notoriedad, como obra de ingeniería y por la respuesta formal. Este tipo de obras de Calatrava constituyen un referente universal por su majestuosidad e impactante respuesta formal.

Las características determinantes del diseño de los puentes de Calatrava se basan fundamentalmente en cubrir una luz importante y, al mismo tiempo, en convertir el puente en una escultura visual desde diferentes ángulos, que destaque por su limpieza volumétrica en el entorno del lugar donde se ha emplazado, que dé una respuesta constructiva impecable y que presente un juego de fuerzas, cargas y ángulos que, combinados con unos

determinados materiales, hagan del puente en cuestión una construcción transparente y de aspecto ligero.

Cada puente de Calatrava es singular, único. Sin importar que se encuentre en Jerusalén, Canadá, Atenas, Valencia o Sevilla. Cada una de sus creaciones se convierte en un elemento de embellecimiento del paisaje, como si de una obra escultórica se tratase.

El objetivo básico de los puentes de Calatrava es el movimiento de personas sobre un elemento que, en su arranque, toca la tierra, vuela luego con ellas sobre un río, un canal, una vía y finalmente vuelve a tierra para entregar a esos transeúntes, sanos y salvos, tras haber mantenido una relación háptica con la escultura en forma de puente, habiéndoles aportado, al mismo tiempo, la solución a un problema urbano, entre otros aspectos a considerar.

Uno de los primeros puentes que construyó Santiago Calatrava fue el Puente del Alamillo. Su forma evoca a la de un arpa, reflejando así dos características claves de su obra: analogías de la naturaleza y el color blanco. A continuación, se disponen diversos puentes, posteriores al estudiado en este trabajo, en los que podemos encontrar muchas similitudes.

Puente de la Mujer. Buenos Aires, Argentina (2001)



Figura 3.4. Puente de la Mujer, Argentina.

Sobre el Río de la Plata en la ciudad de Buenos Aires, Argentina, fue necesario construir un puente peatonal pero que a su vez permitiese el paso de barcos. Así se encargó a Calatrava la construcción de un puente giratorio.

El puente mide 160 m de largo por 6.20 m de ancho y está dividido en tres secciones: dos fijas, una de 25 m y otra de 32,50 m, una en cada orilla del río, y una móvil, de 102,50 m que gira sobre un pilón cónico de hormigón armado blanco que permite en menos de dos minutos el paso de embarcaciones.

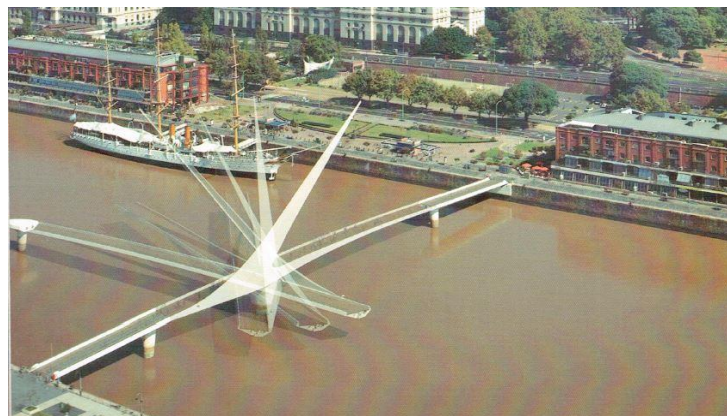


Figura 3.5. Puente de la Mujer, trayectoria del movimiento.



Figura 3.6. Puente de la Mujer, momentos antes y después de accionarse.

Puente Light Rail. Jerusalén, Israel (2008)

Este puente está considerado como una de sus mejores creaciones, no solo por su resultado formal, sino también por la carga cultural que conlleva el hecho de estar emplazado en una ciudad llena de historia y simbolismos, que contiene importantes puntos de peregrinación de judíos, cristianos y musulmanes.

Uno de sus objetivos con esta obra era dirigir el interés de la gente hacia la ciudad y dotar a ésta de una nueva entrada. De ahí que esta estructura se convierta, en cierta manera, en punto de acogida de la puerta del Este de la antigua ciudad de Jerusalén, próximo a la Estación Central de Autobuses.

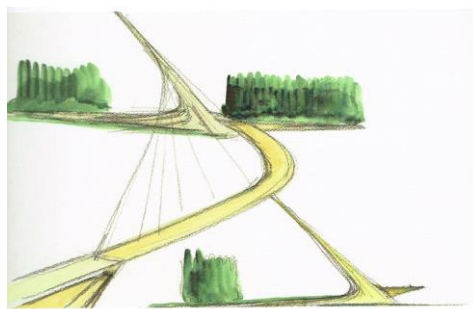


Figura 3.7. Boceto preliminar, Santiago Calatrava.

“Al hacer el puente muy transparente y el mástil muy fino, el impacto visual recae en los cables. Al final, la forma del puente se asemeja a un instrumento musical, con los cables como cuerdas. La idea del puente como arpa me pareció maravillosa. Pensé que la ciudad de David merece un puente que parezca un arpa, instrumento que él tocaba” Santiago Calatrava.



Figura 3.8. Puente Light Rail, Jerusalén.



Figura 3.9. Puente Light Rail, Jerusalén, vista general.

Puente Samuel Beckett. Dublín, Irlanda (2008)

Sobre el río Liffey, en la ciudad de Dublín, Irlanda se construyó este puente debido a la necesidad de disponer de una nueva estructura que marcara una modernidad inconfundible y con un carácter único y que actuara como símbolo en la puerta de entrada marítima de Dublín.

La longitud del puente es de 120 m y tiene un mástil curvo de 48 m sobre el nivel del agua. Se repite aquí la estructura atirantada característica de Calatrava, apoyada en un pilón o basamento de hormigón armado sobre el río Liffey, con unos contrafuertes o estribos del muelle existente, y que pesa 5700 toneladas. El puente gira sobre su propio eje a 90° y así permite el tráfico marítimo de buques.



Figura 3.10. Puente Samuel Beckett, Dublín.

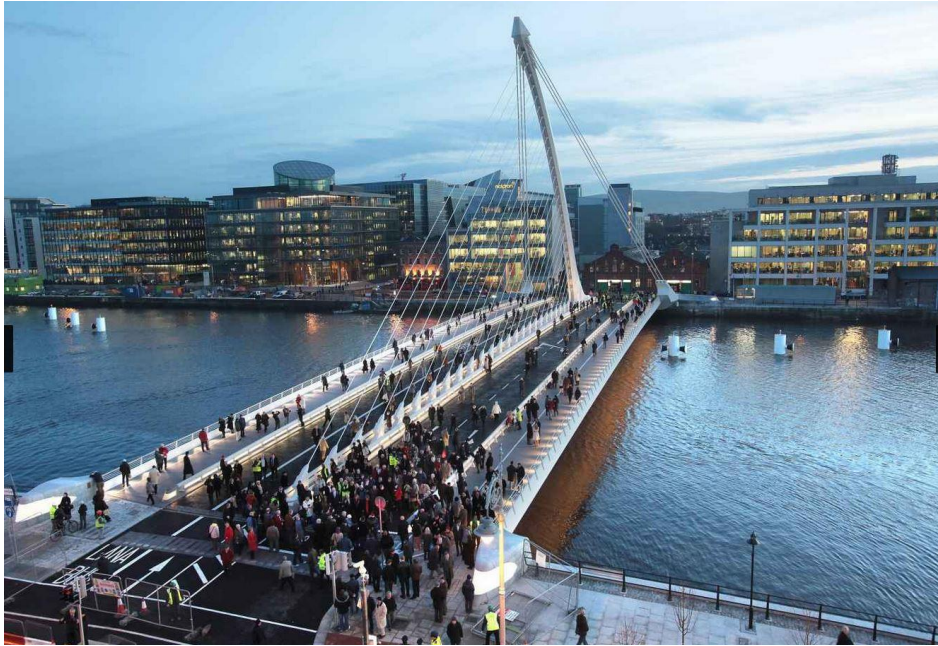


Figura 3.11. Puente Samuel Beckett, Dublín.



Figura 3.12. Puente Samuel Beckett, girado.

Puente Campo Volantín. Bilbao, España (1994-1997)

El puente peatonal sobre el río Nervión, *El Zubizuri*, que significa en euskera “puente blanco” más conocido como *Campo Volantín*, de 75 m de extensión, se forma mediante una pasarela de 14.6 m de ancho y se caracteriza por su limpieza de elementos estructurales. En este caso Calatrava no utilizó dos arcos unidos con estribos y tensores, sino que instaló un esbelto tubo de 4.57 cm de diámetro, al que dio la forma de arco. De esta forma parabólica se desprenden unos tensores a uno y otro lado de la pasarela, en toda la trayectoria que describe el desarrollo del arco. A su vez, el puente se apoya en uno y otro extremo sobre dos estructuras triangulares alargadas de 2 m de ancho cada una, que dan cabida a las rampas de acceso.

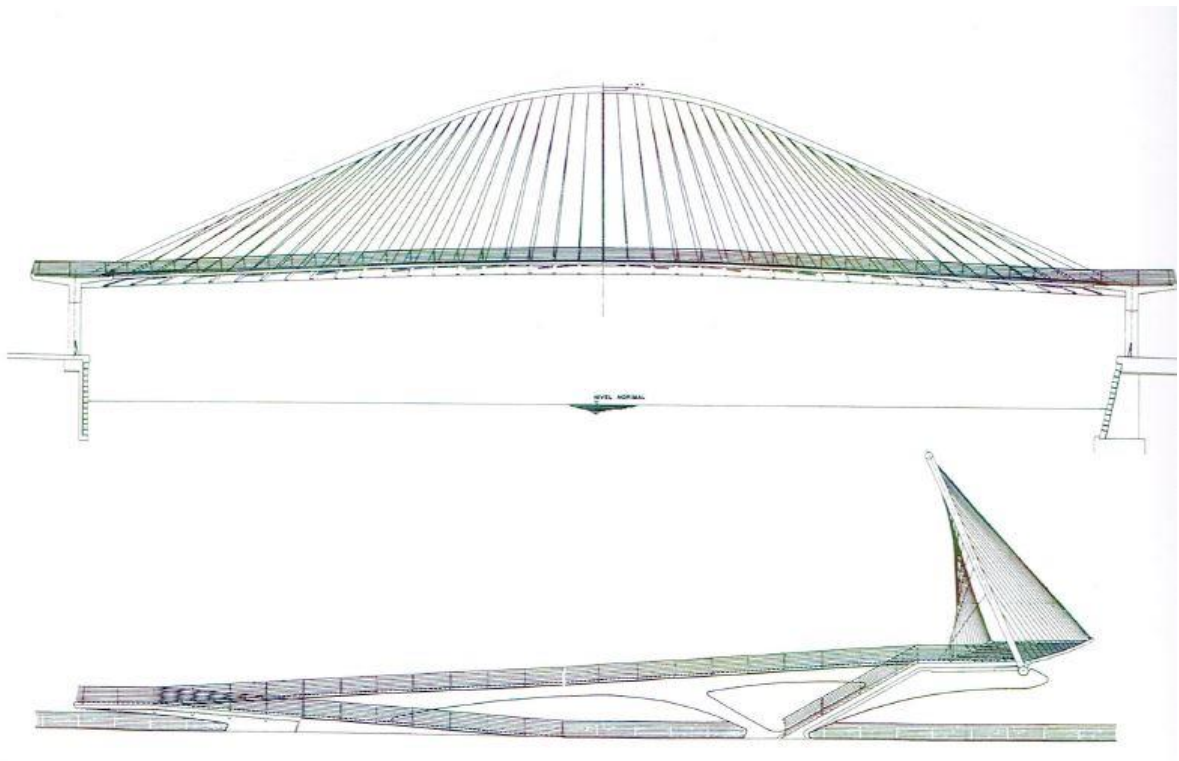


Figura 3.13. Alzado frontal y lateral, Puente Campo Volantín.

La pasarela descansa sobre un tubo central con elementos simétricos que recuerdan una columna vertebral, con 41 costillas de anchos variados. A ello cabe añadir que dicha pasarela es translúcida, por estar armada con placas de cristal con una baranda de acero inoxidable, lo que da a este puente una apariencia más escultórica.

Este puente ha sufrido una gran polémica. En primer lugar, su superficie de cristal es altamente resbaladiza debido al clima húmedo de la ciudad de Bilbao. Por ello el Ayuntamiento se vio obligado a cubrir la superficie acristalada con una moqueta gris atornillada en los laterales. Por otro lado, el diseño original conecta Campo de Volantín con Uribitarte, y no con la Alameda de Mazarredo, que permite el acceso al centro de la ciudad. Para facilitar el acceso, el Ayuntamiento dispuso un andamio con escaleras, pero se tuvo que retirar por las protestas de Calatrava.



Figura 3.14. Puente Campo Volantín, Bilbao.



Figura 3.15. Puente Campo Volantín, Bilbao.

EL VIADUCTO DE LA CARTUJA

4.1 Descripción general

Se trata de un puente de 526.5 m de longitud. El tablero del mismo, de 26.10 m de anchura se organiza en dos niveles. En el nivel superior se establece la circulación de los vehículos de motor, mediante la creación de dos calzadas de tres carriles para cada sentido de tráfico, dejando en el centro una mediana de 2.80 m de anchura. El nivel inferior que se sitúa a ambos laterales, se aprovecha para la circulación de peatones, mediante paseos de 4.40 m de anchura. La sección transversal presenta una forma interior de arco circular de radio 10.60 m, con voladizos laterales en los dos niveles citados.

Todo este conjunto crea un espacio interior, que recibe luz cenital de unas claraboyas de forma troncocónica, situadas en la parte superior del tablero dentro de la zona de separación de calzadas, cuyo diámetro es de 1.80 m en la base mayor, y que están separadas entre sí 3 m.

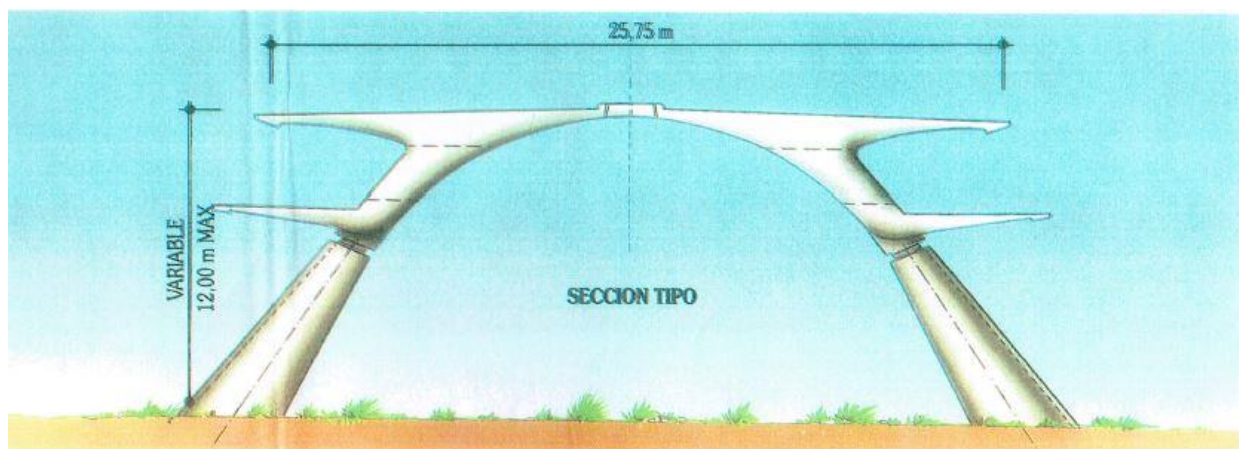


Figura 4.1. Sección tipo viaducto.

Al recinto interior se puede acceder visualmente mediante otras claraboyas. Estas se sitúan en el nivel de las zonas laterales peatonales y están constituidas por aberturas cilíndricas de diámetro 1.80 m e igual separación que las cenitales.

El Tablero se apoya en pareja de pilas, separadas entre sí 24 m, salvo los extremos, cuya separación es de 18 m. Las pilas están constituidas por troncos de cono de eje inclinado y sección elíptica variable.

La longitud total del puente se distribuye en 20 vanos de 24 m cada uno, dos de 18 m y, finalmente, dos pequeños de 5.25 m en las zonas de los estribos.

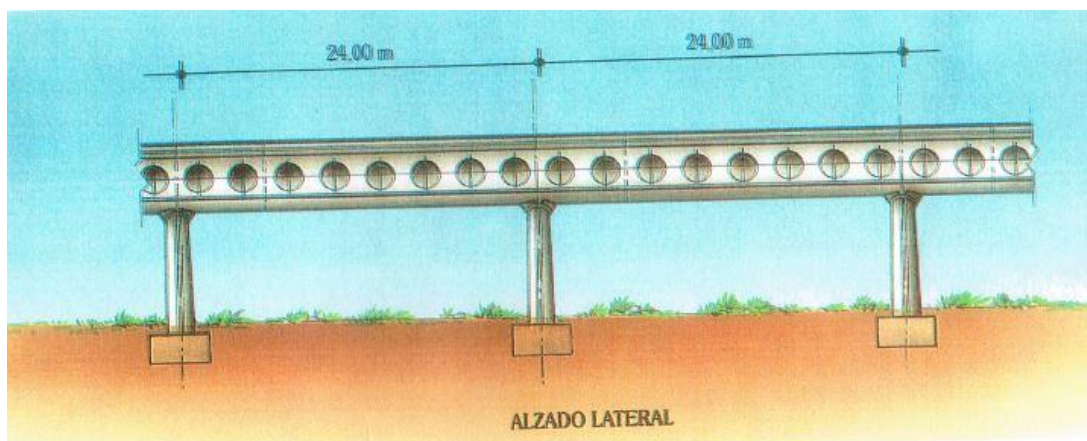


Figura 4.2. Alzado lateral viaducto.

4.2 Modelado con Catia V5

A partir del plano de la sección transversal del viaducto, se comenzó a trabajar con Catia. En primer lugar se definieron los elementos Part. que más tarden se ensamblarían para formar el viaducto (.CATProduct). Dado el peso del archivo por la longitud completa del viaducto (526.5 m), se ha empleado un módulo de 54 m para ilustrar con más facilidad los detalles del ensamblaje, aprovechando que se repiten a lo largo de toda su longitud.

4.2.1 Part 1. Tablero.

En primer lugar, se creó en Catia un archivo .DrawingCat en el que se importó la sección transversal del tablero a partir de los planos .dwg

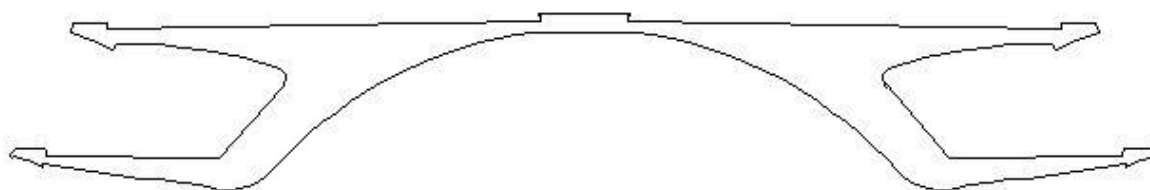


Figura 4.3. Sección introducida en Catia.

Para poder trabajar con archivos importados desde AutoCad hay que comprobar que el contorno esté cerrado y no haya líneas que sobresalgan que provoquen errores al trabajar con la sección en el archivo Part. Para ello, se han empleado las siguientes herramientas, que se pueden usar tanto en el archivo Drawing como al pegar la sección en un sketch en el archivo Part.cat



Sketch Solving Status: nos dice el estado de la sección que analizamos.



Sketch Analysis: nos dice si el contorno es cerrado y que elementos (líneas, puntos etc) tienen

errores.

A continuación, se creó el archivo viaducto módulo 54m.CATPart. En Catia vienen definidos en el espacio los planos xy, yz y zx, por lo que había que elegir uno de ellos donde pegar la sección importada en el Drawing. Esto condicionaría el posterior modelado ya que todo tomaría referencia respecto al plano elegido. Se eligió el plano zx donde se introdujo nuestra sección citada antes y se empleó la herramienta Pad.



Pad (extrusión): creación de un sólido a partir de un perfil.

Se hizo una extrusión de 27 m para cada lado, dejando el centro de coordenadas global en el centro del sólido creado.



Figura 4.4. Tablero extrusionado.

Seguidamente, se hicieron las claraboyas del nivel de las zonas peatonales de diámetro 1.80 m y separadas entre sí 3 m. Para ello se empleó el plano yz donde se dibujaron círculos con el diámetro y la separación indicados. Posteriormente, se empleó la herramienta Pocket para perforar la sección del tablero y así crear las claraboyas laterales.



Pocket: análogo a la herramienta Pad, pero en vez de crear genera una retirada de material.

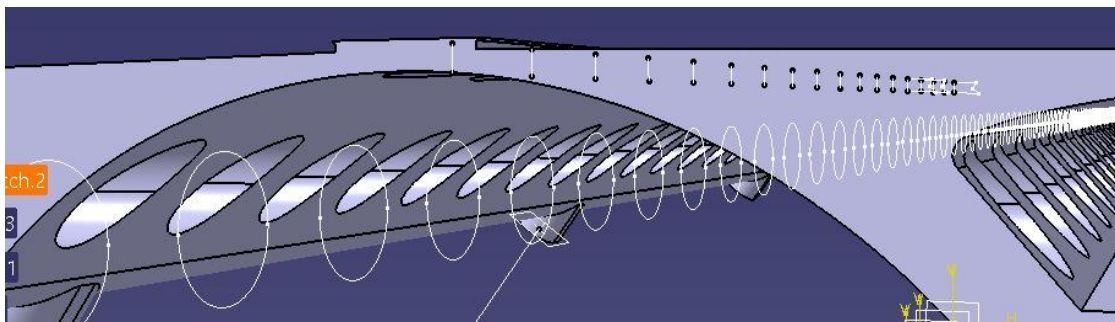


Figura 4.5. Sketch para realizar Pocket de las claraboyas laterales.

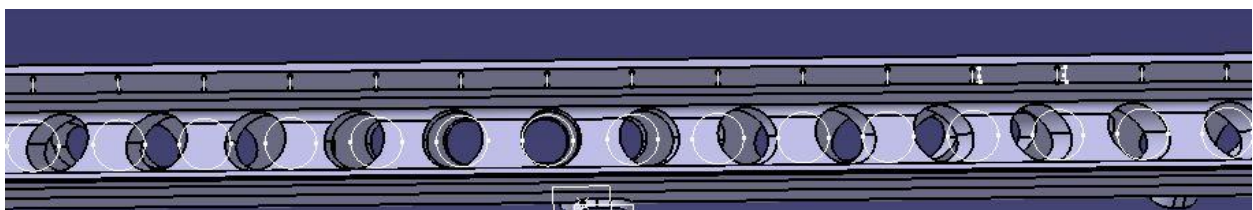


Figura 4.6. Pocket realizado.

A continuación se crearon las claraboyas superiores de forma troncocónica con diámetro 1.80 m en la base mayor y 1.60 m en la inferior, separadas entre sí 3 metros también. Para ello se empleó la herramienta Groove.



Groove : vaciado de revolución

A diferencia de la herramienta Pocket, no se puede seleccionar un sketch y hacer todos los agujeros a la vez, sino que hay que ir uno a uno.

Se dibuja en un sketch la sección de la figura y se realiza un Groove de 360° tomando la línea vertical que se puede ver como referencia.

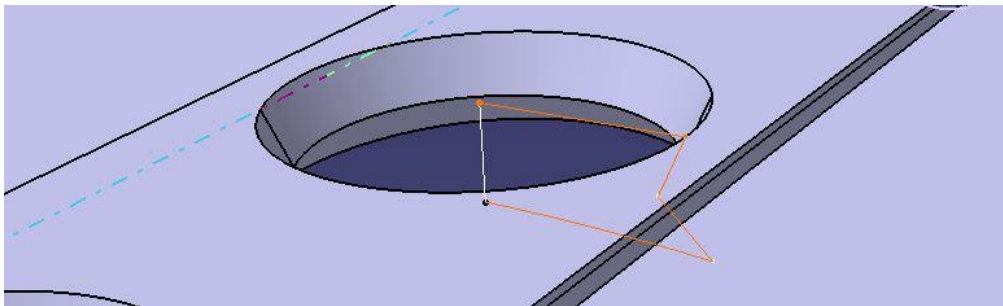


Figura 4.7. Sección para el Groove.

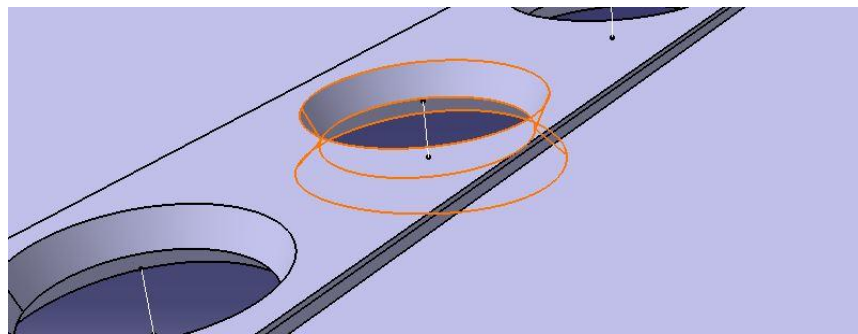


Figura 4.8. Groove.

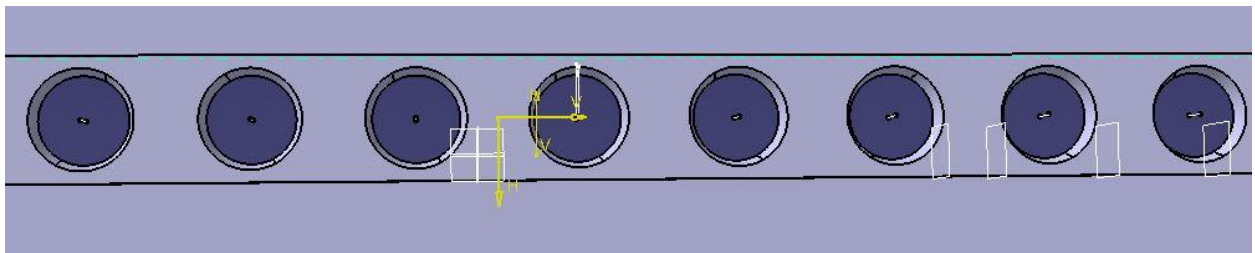


Figura 4.9. Grooves realizados.

Una vez realizadas las claraboyas, se ha procedido a dimensionar la zona de unión con los pilares. Entre el tablero del viaducto y la zona de apoyo, existe una prolongación del tablero con forma de óvalo (vista A plano 2). Este óvalo tiene la misma inclinación que el pilar de sección transversal elíptica variable que más adelante se explicará como se ha dimensionado. Se han definido puntos, líneas constructivas y el plano con esta inclinación, donde se dibujará el sketch del óvalo.

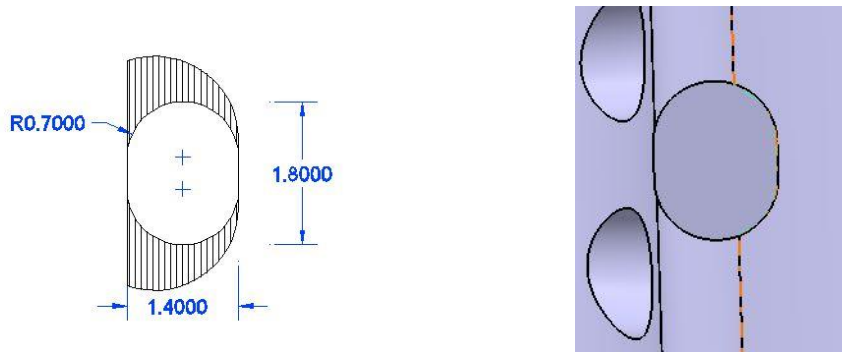


Figura 4.10. Óvalo.

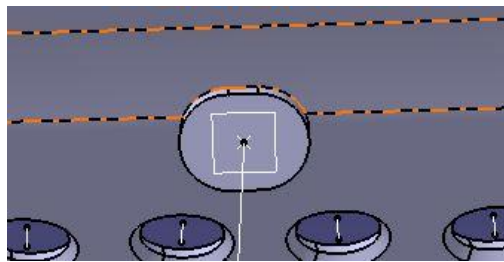


Figura 4.11. Pad óvalo.

Otra vez usando la herramienta Pad (extruir up to the next) se construyeron estas prolongaciones del tablero. Con ayuda de la herramienta Mirror, se realizaron el resto.



Mirror: respecto a un plano, permite hacer el simétrico, sin borrar el elemento de partida.

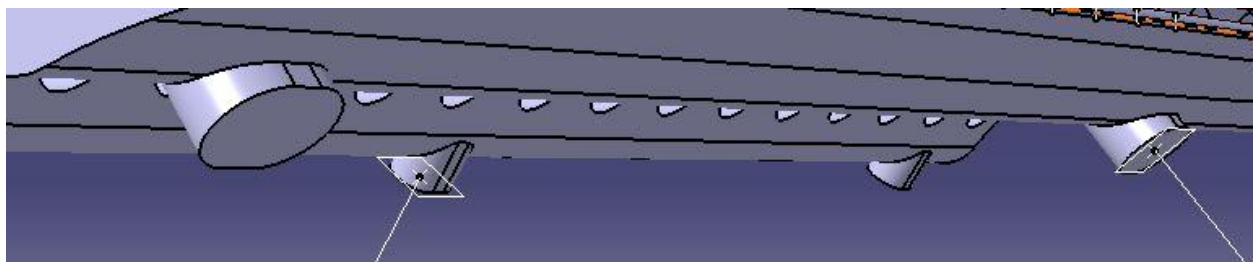


Figura 4.12. Vista global.

Se realizó un Mirror respecto al plano yz y otros dos respecto a otros planos creados mediante offset del plano zx. Como no se puede hacer un mirror respecto a un elemento creado por este método, se ha tenido que dibujar

otra vez la sección del óvalo en el lugar correspondiente y ya hacer otro mirror más hasta tener las 6 prolongaciones correspondientes a los 6 pilares de nuestro tramo de 54 m.

4.2.2 Part 2. Zona de apoyo.

En los planos proporcionados por la Consejería de Fomento y vivienda, no se describe bien la zona de apoyo. Por ello se ha visitado el viaducto, y se han realizado fotos. Se ha podido comprobar que esta zona está constituida por cuatro muelles y dos placas.

Para simplificar nuestro modelo, se ha modelado como un disco y una placa cuadrada, a los cuales se les podrá asignar las características resistentes del material (rigidices, módulo de Young etc), para realizar un análisis en elementos finitos.

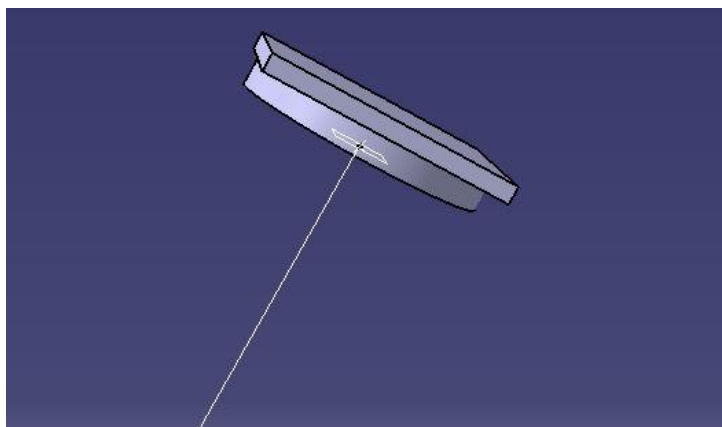


Figura 4.13. Zona de apoyo.

4.2.3. Part 3. Pilares.

Las pilas están constituidas por troncos de cono de eje inclinado y sección elíptica variable.

Se han dibujado dos circunferencias en dos sketch diferentes, separados la altura del pilar, y unidos por una recta que tiene la inclinación correspondiente. Así, con la herramienta Multi-Section Solid se ha generado el sólido a partir de estas dos circunferencias.



Multi-Section Solid: genera un sólido a partir de varias secciones, se le puede dar de directriz una recta (coupling)

En varias ocasiones, esta herramienta daba error al seleccionar las circunferencias. Se resolvió mediante el empleo de Auto Constraint en cada sketch.



Auto Constraint: fija las dimensiones seleccionadas.

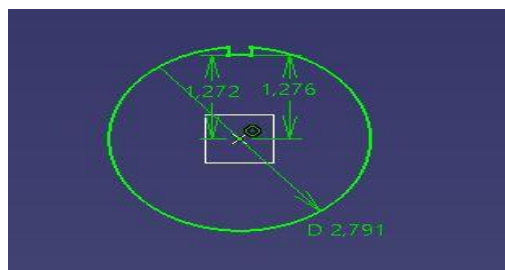


Figura 4.14. Sección introducida en Catia pilar.

Como el pilar tiene sección elíptica y no circular, se ha realizado dos cortes mediante la herramienta Split, obteniendo así la base elíptica.



Split: corte respecto a un plano (señalados en naranja)

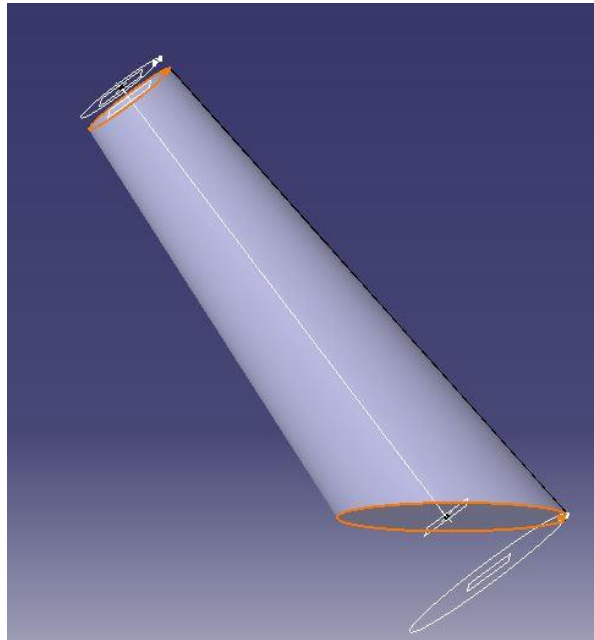


Figura 4.15. Pilar.

Además destacar, que en los planos de la Consejería de Fomento y vivienda no se apreciaba el detalle de una abertura en un lateral del pilar, cosa que sí se observó el día que se hicieron fotos del viaducto y se han añadido al modelo.

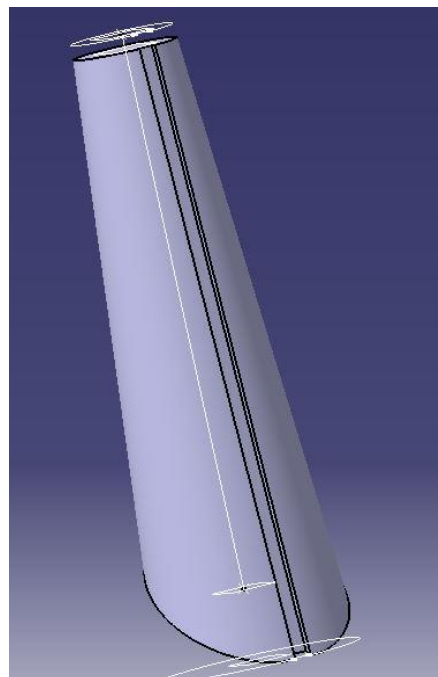



Figura 4.16. Comparación pilar modelado en Catia y en la realidad.

4.2.4. Assembly Design

En un archivo .CATProduct se han unido todas las partes creadas antes. En primer lugar se insertó el archivo viaducto completo.CATpart. Seguidamente, se han introducido las zonas de apoyo y los pilares.

Para colocar las zonas de apoyo en su lugar de correspondiente, en contacto con la sección en óvalo, se ha

usado la herramienta Manipulation  que permite mover y girar la pieza seleccionada en cualquier dirección.

Posteriormente, para colocar la pila en contacto con la sección de apoyo, se ha empleado la herramienta Contact Constraint, seleccionando las superficies que queremos que estén en contacto.



Figura 4.17. Contact constraint para poner la pila en su sitio adecuado.

Destacar que en nuestro tramo de 54 m se disponen 6 pilares y por ello 6 zonas de apoyo. Solo se ha dimensionado un pilar y una zona de apoyo por lo que será necesario aplicar la herramienta Symmetry en este archivo Product. Al realizar esto, se generan automáticamente archivos Part con los elementos simétricos generados.



Symmetry. Se han realizado 10 simetrías (5 para el pilar y otras 5 para la zona de apoyo, haciendo un total de 6 pilares y 6 zonas de apoyo junto con el original)

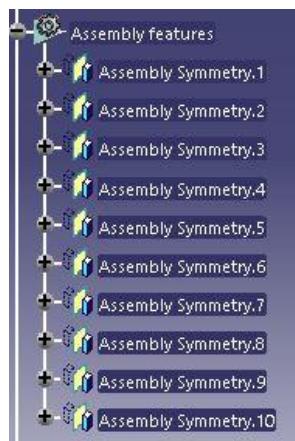


Figura 4.18. Simetrías realizadas.

Vista global:

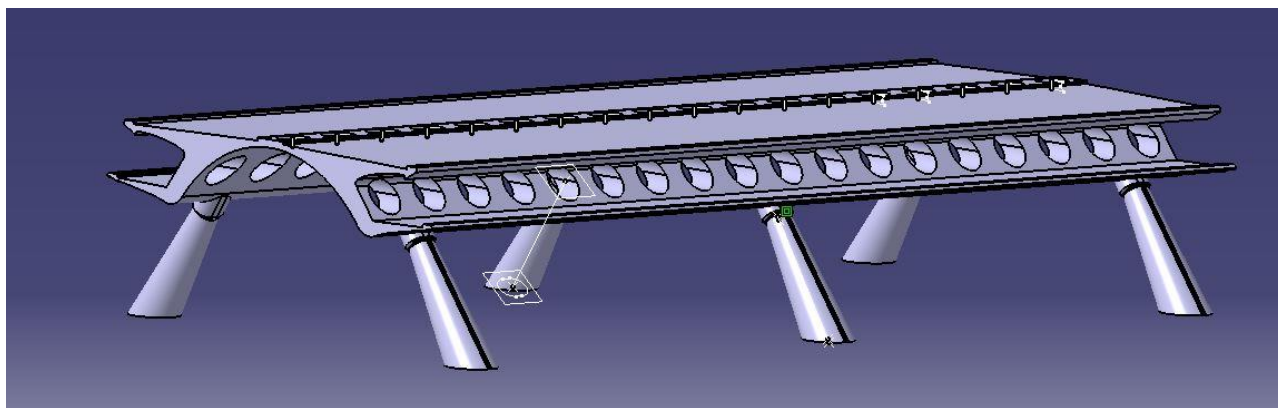


Figura 4.19. Vista global 1.

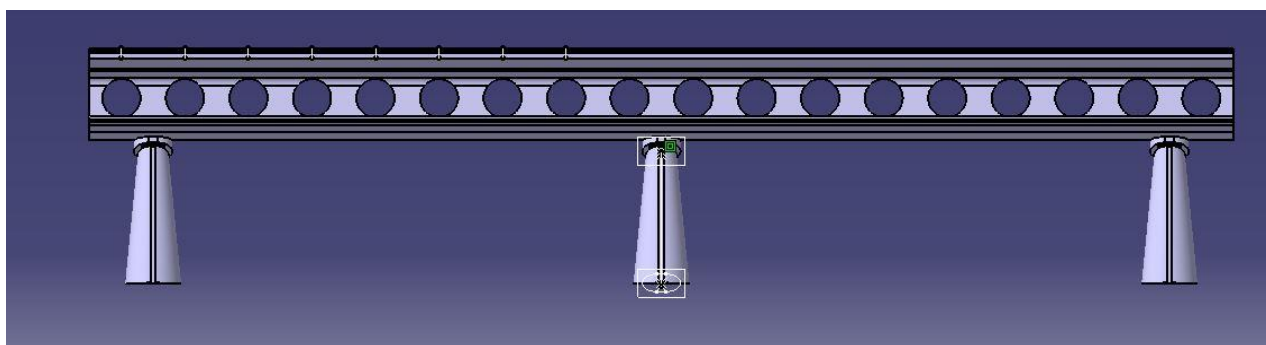


Figura 4.20. Vista lateral.



Figura 4.21. Viaducto en la realidad.



Figura 4.22. Vista interior viaducto.



Figura 4.23. Vista interior viaducto 2.

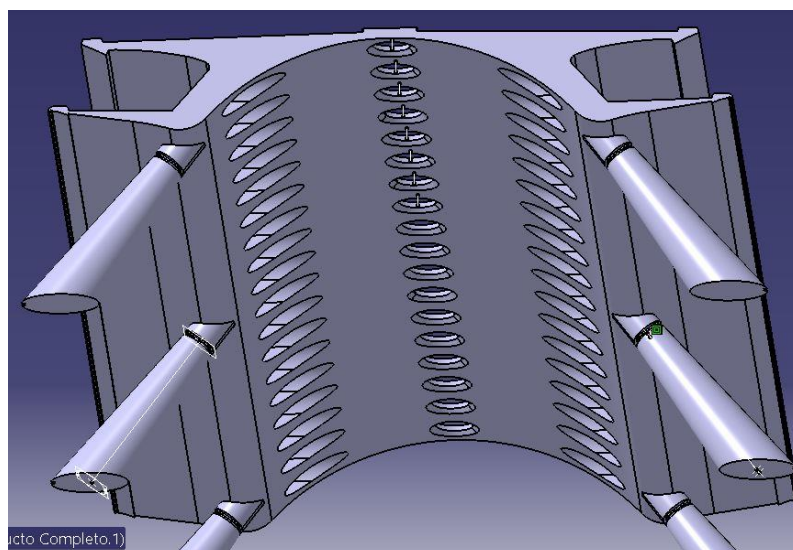


Figura 4.24. Vista interior viaducto modelado en Catia.



Figura 4.25. Vista interior viaducto 3.

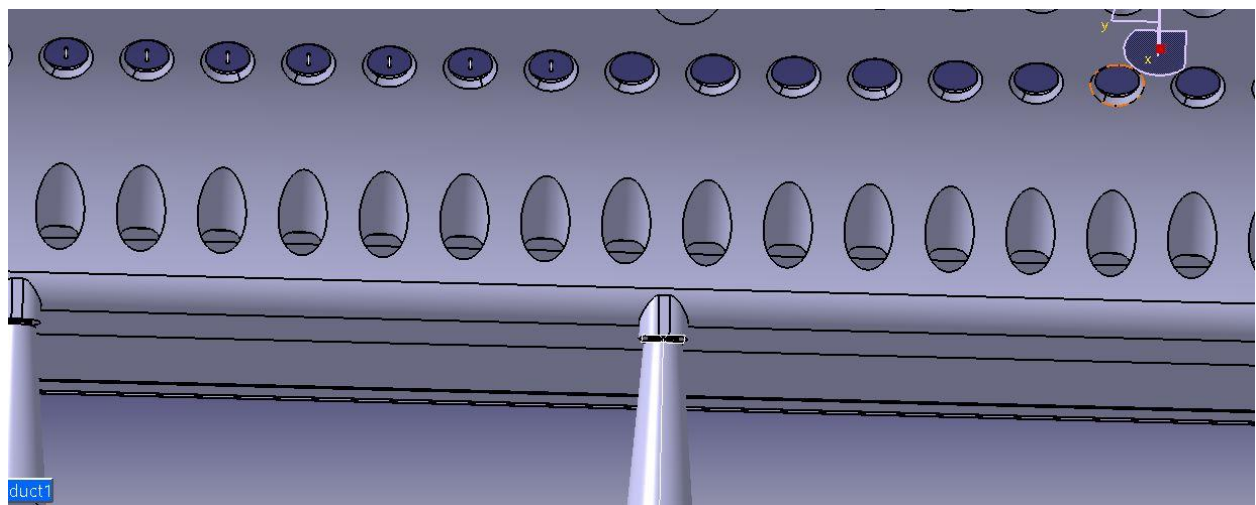


Figura 4.26. Vista interior viaducto en Catia.

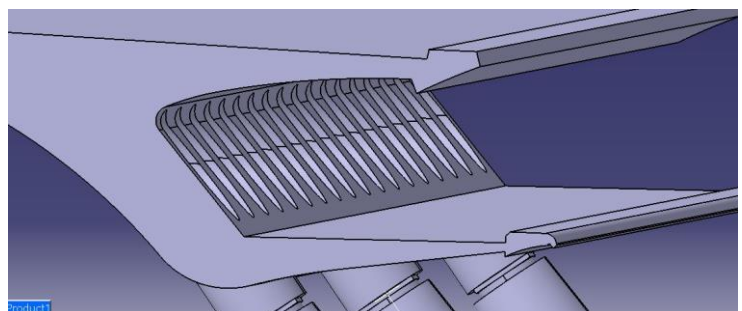


Figura 4.27. Pasarela peatonal en la realidad y en Catia.

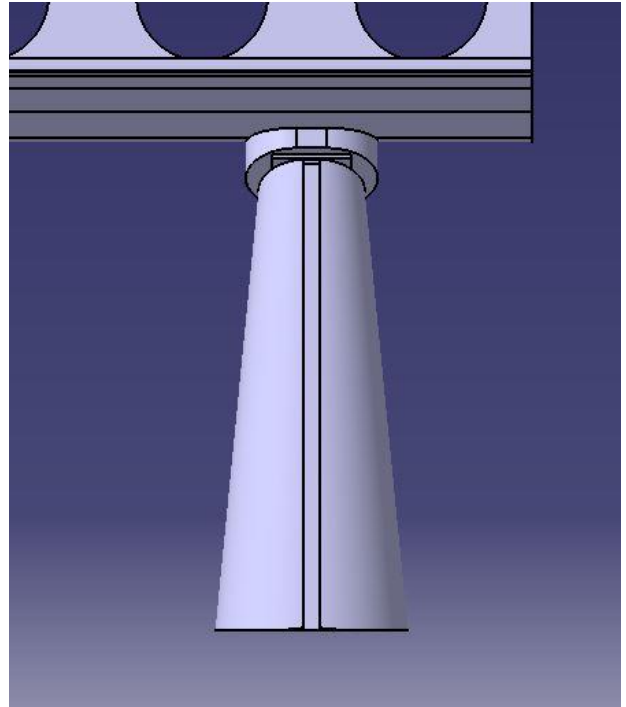


Figura 4.28. Pila en la realidad y en Catia.

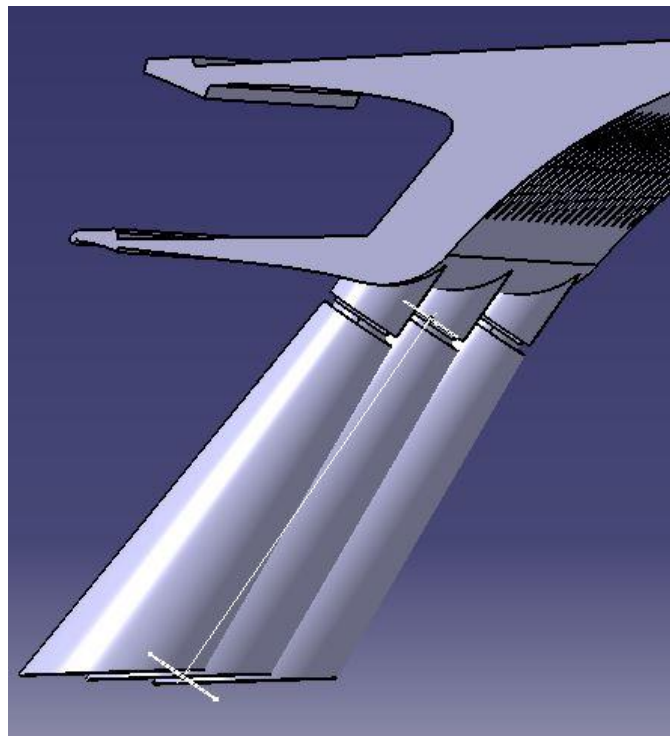


Figura 4.29. Pilas en la realidad y en Catia.

4.3. Proceso de cálculo del viaducto.

La tipología propia de este tablero impidió efectuar sus cálculos por medios convencionales. Se trata de una sección abovedada, con apoyos puntuales y con una relación luz/ancho próxima a 0.8, lo que obligó a un cálculo por el método de los elementos finitos.

Mediante el empleo del programa de ordenador ANSYS, versión 4.4, se realizó el análisis de tensiones bajo hipótesis de carga más desfavorables. Para optimizar el estudio, se tuvo en cuenta que:

- La estructura es igual en todos los vanos intermedios, lo que permite el análisis de uno de ellos y la aplicación de condiciones de contorno, de simetría y antisimetría, para simular el efecto de cargas en el resto.
- Para la obtención de esfuerzos con un mínimo de fiabilidad fue preciso una discretización muy fina, lo que conllevó un número elevado de elementos.

Para simplificar los cálculos, procedió al análisis de una longitud del tablero correspondiente a tres vanos mediante una malla de elementos, de forma que el número de hipótesis de simetría y antisimetría se redujera al mínimo. A continuación, se analizó una subestructura de la misma correspondiente a un cuarto del vano (cortado por el eje longitudinal y los planos transversales por pilas y centro de la luz) con una malla más fina, aplicando en los bordes de la subestructura las condiciones de contorno correspondientes.

De esta forma se obtiene para los tres vanos la misma precisión de cálculo que con una malla fina, limitando el número de hipótesis y el número máximo de elementos, que en nuestro caso llegó a 2156 en el modelo global y a 1890 en la subestructura.

Los resultados se representaron gráficamente, procesándose numéricamente mediante varios programas auxiliares, específicamente realizados para este proyecto, lo que permitió tratar varios miles de resultados en corto espacio de tiempo. Cabe destacar la preparación de un programa de aplicación de pretensado espacial a un modelo de elementos finitos.

4.4 Proceso constructivo

4.4.1 Pilas

El perfil geotécnico de la traza comprende tres niveles de terrenos constituidos por limos, arenas y gravas, situados sobre una base de margas. La solución adoptada para la cimentación de las pilas consistió en modelos de pantalla de 3 por 0.80 m, empotrados en las gravas.

La cimentación se completaba con un encepado de 2 m de canto. Con objeto de compensar los esfuerzos horizontales transmitidos a la cimentación debido a la inclinación de las pilas, cada pareja de encepados se atiranta con una riostra postesada.

Las pantallas fueron ejecutadas mediante excavación con lodos y cuchara bivalva. En vez de utilizar los clásicos muretes de hormigón armado, se empleó un marco de perfil metálico, fácilmente desmontable y reutilizable, como guía de la cuchara durante la excavación.

La ejecución de los encepados presentó dificultades en el replanteo de las armaduras de espera de las pilas, dadas las peculiaridades de las mismas. Para efectuar esta operación se emplearon unas guías metálicas ranuradas, donde se situaban, con gran precisión, los redondos de las esperas, que garantizaban su inclinación variable. La ferralla de las pilas se colocó guiándose de las esperas en su parte inferior y superiormente mediante una plantilla, sujeta al andamiaje desde donde se efectuaban estas operaciones.



Figura 4.30. Proceso constructivo de la pila.

Debido al gran peso de las armaduras y a su inclinación, fue preciso sujetarlas mediante un cable anclado al terreno, a través de un tráctel de 5 Tn. El encofrado de las pilas, por su fuerte inclinación, soportaba unas cargas importantes verticales en unas zonas. Todos estos efectos obligaron a una perfecta sujeción del encofrado a la zapata y a un apuntalamiento contra ella mediante un sistema combinado de puntales y tirantes. En su parte superior disponía de una plataforma para el acceso del personal que efectuaba las operaciones de hormigonado.

El hormigonado se realizó con bomba. Debido a la altura y geometría de las pilas, fue preciso que dos operarios trabajaran dentro del encofrado para garantizar un perfecto vibrado del hormigón en las zonas inferiores a la misma.

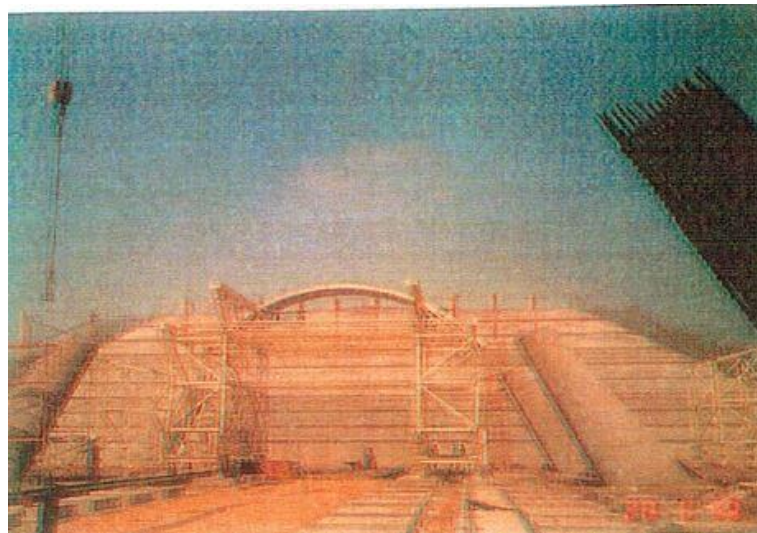


Figura 4.31. Proceso constructivo pilas y viaducto.

La complicación estructural se tradujo también en la elección de los aparatos de apoyo del viaducto. Estos quedaron constituidos por unos apoyos deslizantes inclinados de teflón tipo Pot, guiados longitudinalmente y con desplazamiento transversal impedido. Al ser los apoyos deslizantes, para la transferencia de acciones horizontales del tablero a pilas en el sentido longitudinal, se disponen cuatro muelles horizontales de neopreno, de tal forma que éstos poseen una rigidez adecuada a los movimientos relativos del tablero en cada pila, que, para simplificar, en nuestro modelo han sido dimensionados como un disco y una placa cuadrada.

4.4.2 Tablero

El proceso constructivo del viaducto se planteó mediante el empleo de una cimbra trasladable. Se adoptó esta solución ya que se trataba de una estructura de gran longitud, constituida por muchos vanos, además de que la sección transversal del mismo era uniforme, la elevación sobre el terreno era reducida, el plazo de ejecución era bastante estricto y finalmente, porque se facilitaba el replanteo de los múltiples elementos singulares que posee el puente, como los aligeramientos, tapes, etc.



Figura 4.32. Proceso constructivo viaducto.

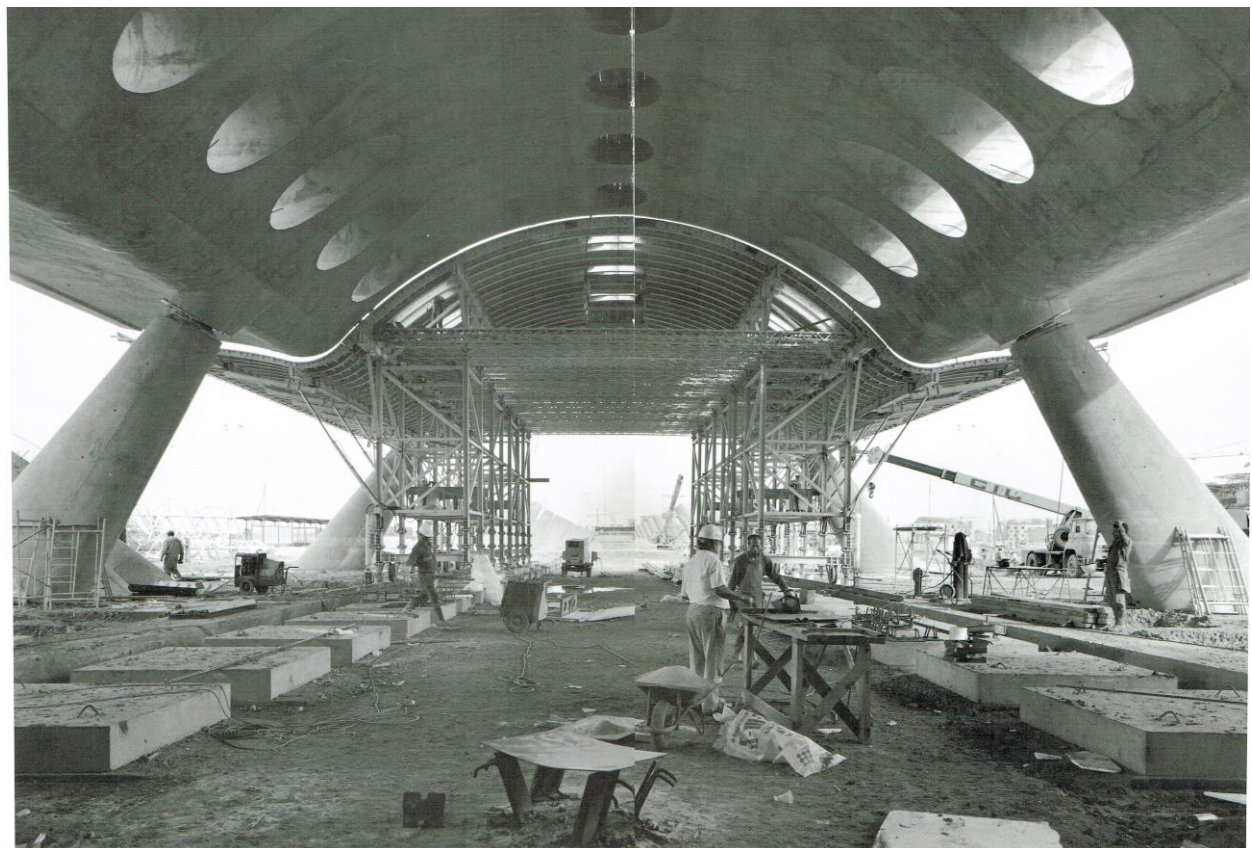


Figura 4.33. Proceso constructivo viaducto, cimbra trasladable.

La complejidad de la sección transversal aconsejó hormigonar en dos fases. En primer lugar, la sección completa del arco circular, junto con los dos voladizos inferiores formando un conjunto estructural estable.



Figura 4.34. Trabajos de hormigonado.

Luego, en una segunda etapa, separada en el tiempo con respecto a la primera y con equipos independientes, se completaba la sección ejecutando los voladizos superiores de la sección.



Figura 4.35. Fase 1 hormigonado.

La conexión entre armaduras de ambas fases se efectuaba mediante manguitos, que se dejaban embebidos en el hormigón de la primera fase.

La segunda fase se ejecutaba después del tesado completo de la sección, por lo que funcionaba de una manera completamente independiente de la primera.



Figura 4.36. Fase 2 hormigonado.

Programa de ejecución

Gracias a los sistemas elegidos de ejecución del tablero, la progresión de la construcción del mismo se podría calificar de altamente satisfactorio. El comienzo de la ejecución del tablero se produjo el día 25 de agosto de 1990 y la finalización de la segunda fase del hormigonado el 14 de octubre de 1991, por lo que podemos decir que el tablero se construyó en un plazo de 13 meses y medio. Salvo los primeros momentos de acoplamiento de los equipos, se pudo considerar óptimo el rendimiento obtenido en esta obra de un vano por quincena, dadas sus especiales singularidades.

Instrumentación y control

Debido a la poca capacidad portante del terreno de apoyo de la cimbra, se tenían ciertas dudas de la influencia del asiento del carro portaenfrado en la transferencia de carga sobre las pilas durante el hormigonado.

Para poder observar estos fenómenos se instrumentaron algunas pilas, situando dos exténsometros de cuerda vibrante por pila en las generatrices de máxima y mínima pendiente.

También, como consecuencia de la acusada sensibilidad de la estructura a los movimientos de la cimentación, se estableció un control sistemático de los giros de encepado, así como de los desplazamientos transversales en cabeza y arranque de pila.

Los controles de giros de encepado, que se traducen en movimientos verticales, se ha controlado topográficamente, mientras que los de convergencia de pilas se hacían con el empleo de cinta invar.

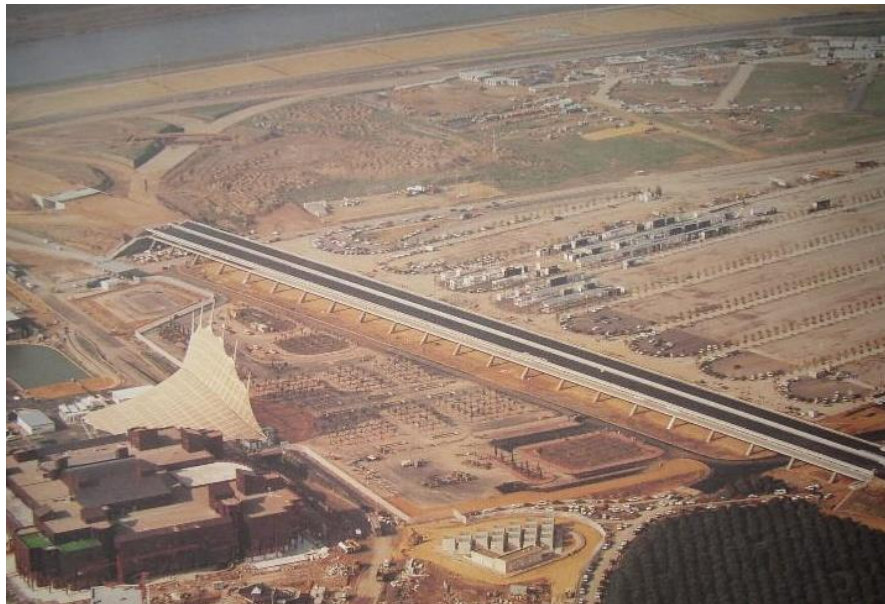


Figura 4.37. Viaducto construido.

EL PUENTE DEL ALAMILLO

5.1 Descripción general

En el contexto de la Expo'92, se plantea un puente atirantado con un mástil inclinado que debe tener unas dimensiones considerables para convertirse en un emblema de la ciudad, y además, dadas sus dimensiones, debe tener una capacidad resistente importante para resistir esfuerzos de compresión, flexión etc.

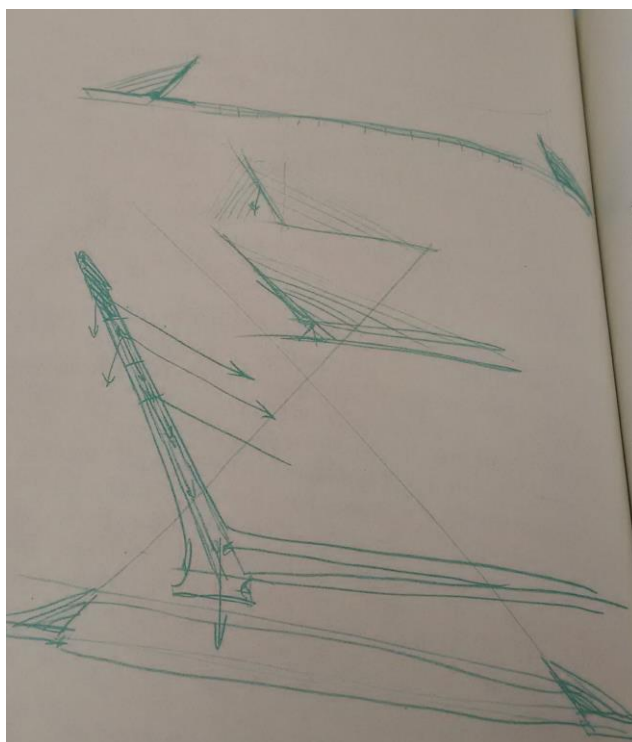


Figura 5.1. Bocetos Calatrava del Puente del Alamillo.

Para jerarquizar los distintos tráficos, el tablero central tiene una sobreelevación, para que la figura predominante en el puente sea el peatón, que destaca y se eleva del tráfico rodado. Es por ello por lo que se diseñó una gran viga cajón metálica de 4.40 m, de sección hexagonal, en la que se empotran cada 4 metros unas costillas.

Con la inclinación del mástil, el puente actúa como una balanza, en la que se da un estado de esfuerzos permanentemente óptimo. Esta idea de la balanza es bastante compleja, sobre todo en cuanto al desarrollo del proyecto, la construcción de la estructura y el control de la misma. Hubo que encontrar un equilibrio entre las necesidades del Proyecto y la tecnología actual disponible.

Desde el punto de vista estructural, es la primera vez que se plantea la construcción de un puente atirantado cuyo mástil no disponga de cables de retenida. En nuestro caso, el tiro de los tirantes del tablero es equilibrado mediante la inclinación del mástil, formando así una balanza, cuyo diseño planteó importantes problemas estructurales relacionados con el proceso constructivo.

Su ejecución fue todo un reto: se tuvo que construir un mástil de 134 m de altura, inclinado 32° con la vertical, sometido a grandes esfuerzos cambiantes tanto en el proceso constructivo como en la vida de la estructura y además su plazo de finalización vino fijado por el comienzo de la Exposición Universal.

Nos encontramos con una estructura que presentó una gran innovación tecnológica. El hecho de tener que controlar los esfuerzos durante la construcción para que se adaptasen a los previstos en el Proyecto supuso el empleo de una instrumentación que permitía obtener en todo momento los esfuerzos en las secciones críticas del tablero y del mástil, la variación de esfuerzos en apoyos provisionales e incluso la variación de la temperatura y gradientes térmicos en los diferentes elementos estructurales. Por ello, esta obra sirvió como fuente de estudio para los investigadores en cuanto al comportamiento estructural, y así, sacar conclusiones de aplicación práctica en otro tipo de construcciones.

En qué medida el puente del Alamillo ha conseguido contribuir a los objetivos de la Exposición Universal de Sevilla y representar ese nexo de unión entre lo antiguo y lo moderno, la historia lo definirá. Pero lo que sí se ha conseguido es que esta obra contribuya de forma importante al desarrollo tecnológico y científico de la Comunidad Internacional, y al propio éxito de la Exposición Universal de Sevilla.



Figura 5.2. Puente del Alamillo.

El Puente del Alamillo es una estructura atirantada de un único vano de 200 metros de luz, con atirantamiento central compuesto por 13 familias de tirantes paralelos formando un “arpa”.



Figura 5.3. Puente del Alamillo.

Tablero

El tablero está formado por un cajón metálico de ancho variable y sendos voladizos laterales de 13.20 m de anchura. El cajón metálico tiene 4.40 m de canto y su sección transversal forma un hexágono. Los voladizos están compuestos por costillas metálicas separadas unos 4 metros y por una losa superior de hormigón armado constituida a base de placas prefabricadas de 10 cm de espesor y de 13 cm de hormigón colocado “in situ” encima de dichas placas. El tablero se ancla al mástil mediante 13 parejas de tirantes paralelos, que nacen de los bordes del cajón metálico central. Cada pareja de tirantes está formada por 60 torones de 0.6” de diámetro cada uno, salvo los que constituyen la última pareja, de 292 m de longitud, que está formada por 45 torones de 0.6”. Los torones van autoprotegidos mediante un tratamiento a base de resina epoxi, quedando el conjunto de los torones dentro de una vaina de polietileno de alta densidad, que a su vez está inyectada en las zonas de anclaje.

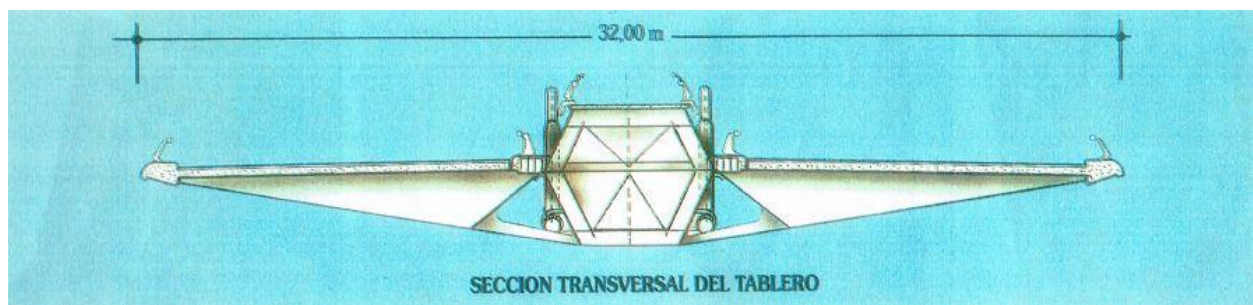


Figura 5.4. Sección transversal del tablero.

El mástil

El mástil, al que se anclan los tirantes, constituye una estructura compuesta de hormigón y acero. Su sección transversal es variable y lleva interiormente un aligeramiento elíptico con el eje mayor variable y el menor constante de 4 metros hasta la cota 76.15 y de 2 metros desde la cota 76.15 hasta la cota 132.25. La altura total del mástil desde la base del pedestal (7.00 m) hasta la cota de coronación (141.25) es de 134.25 metros. El mástil tiene una inclinación de 32° respecto a la vertical, lo que permite equilibrar el tiro de los tirantes sin necesidad de utilizar cables de retenida. Ambas estructuras, mástil y tablero, se empotran en el pedestal, que, a su vez, se empotran en 54 pilotes de 2 metros de diámetro y 47.5 m de longitud.

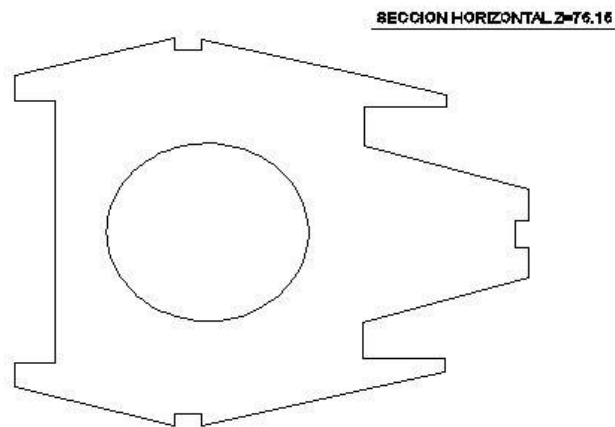


Figura 5.5. Sección horizontal pilono cota Z=76.15 m.



Figura 5.6. Pilono.


5.2. Modelado con Catia V5

Lo primero y más importante, fue definir el sistema de coordenadas global. Éste se tomaría en la cota 0 según viene marcada en el plano nº 7 (mástil), a 2.55 m por debajo del encepado inferior. Así, a la hora de ensamblar todos los archivos .part sería más fácil posicionarlos en el sitio correspondiente.

5.2.1 Part 1. Pilono cuerpo y cabeza

Una vez definido el centro de coordenadas, se crearon dos planos mediante offset del plano xy con la posición correspondiente a las cotas de inicio ($Z=36.00$ m) y fin del pilono ($Z=125.08$ m) sin la cabeza.

El pilono está formado por dovelas, cada una independiente de la otra. Por simplicidad y dado que las dovelas forman un pilono continuo sin discontinuidades geométricas, se ha generado un sólido mediante la

herramienta Multi-Section Solid , partiendo de la dovela nº 4 en la cota $Z=36.00$ m hasta la dovela 16 (cabeza) cuya cota superior es $Z=125.08$ m.

Se ha procedido igual que con el tablero del viaducto. Como tenemos en los planos todas las secciones de las dovelas, que varían unas magnitudes geométricas A, B, C etc tal y como se recogen en la tabla del plano nº 8, se ha creado un archivo Drawing.CAT para importar estas dos secciones desde AutoCad, que son las que se pegarán en cada uno de los sketch creados anteriormente. Añadir además que el hueco interior por donde van las escaleras no se ha dimensionado por simplicidad.

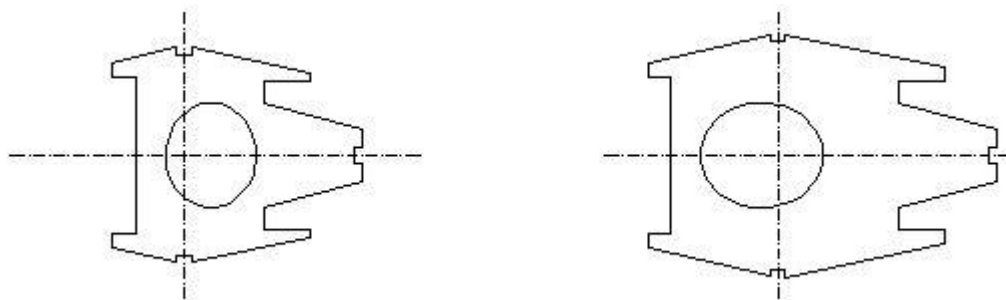


Figura 5.7. Secciones horizontales cotas $Z=125.08$ m y $Z=36.00$ m

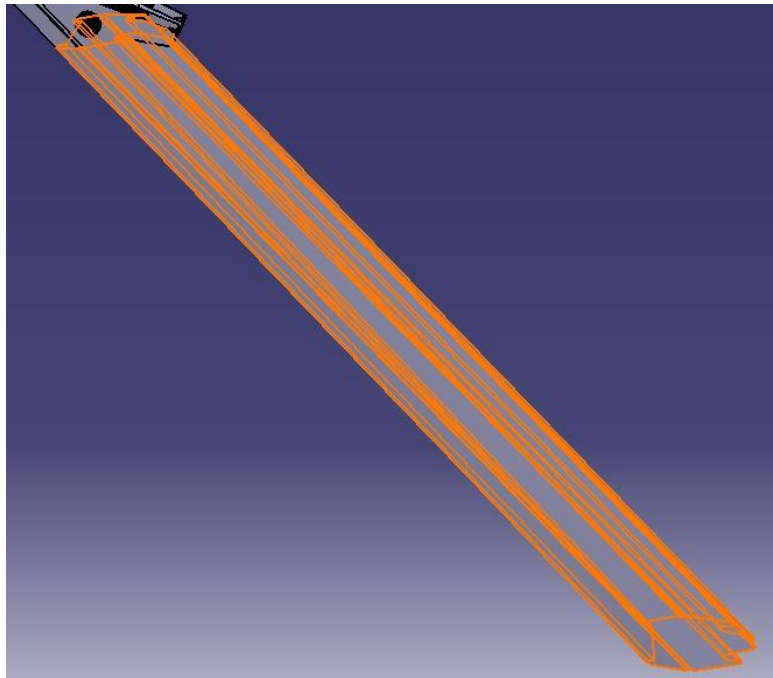



Figura 5.8. Pilono modelado en Catia.

Una vez obtenido el pilono, se procedió a modelizar la cabeza. Para entender bien la forma de ésta, es recomendable mirar el plano n° 9 antes.

Partiendo de la sección de la dovela 16, se copió esta misma sección en otro sketch paralelo y separado del anterior la altura correspondiente hasta la cota de coronación del puente, es decir, la parte superior de la cabeza. Se usó de nuevo la herramienta Multi-Section Solid .

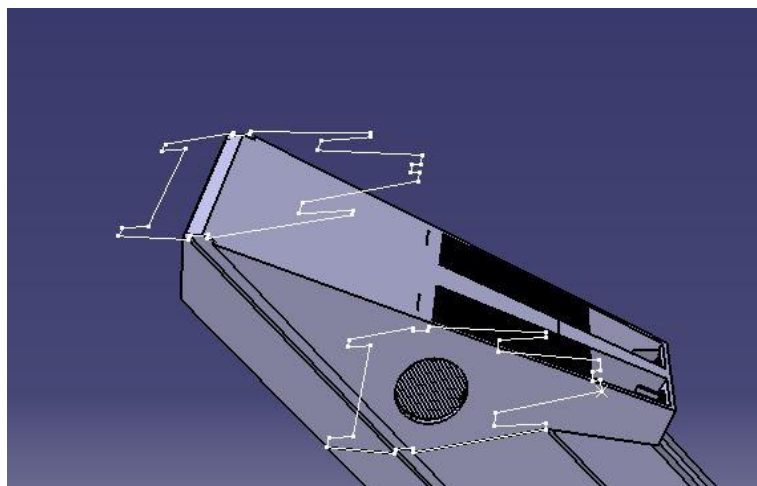



Figura 5.9. Cabeza. Multi Section Solid 1.

A continuación, mediante la herramienta Split , y definiendo los planos en la dirección adecuada a través de tres puntos con coordenadas conocidas por los planos en AutoCad, se fue moldeando la cabeza.

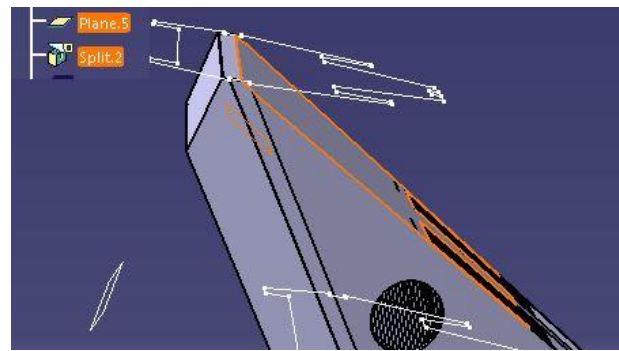
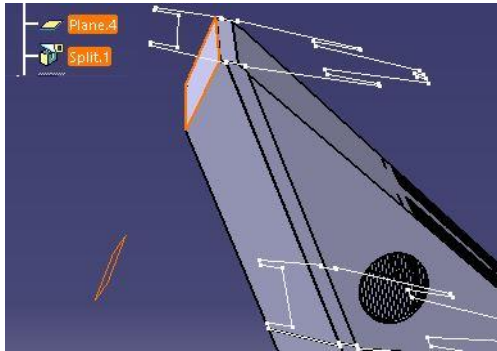


Figura 5.10. Splits cabeza.

Ahora se ha procedido a vaciar la cabeza, utilizando fundamentalmente la herramienta Pocket, ya que en su interior hay una plataforma mirador. En primer lugar se ha realizado un offset de la sección de la dovela 16 hacia su interior

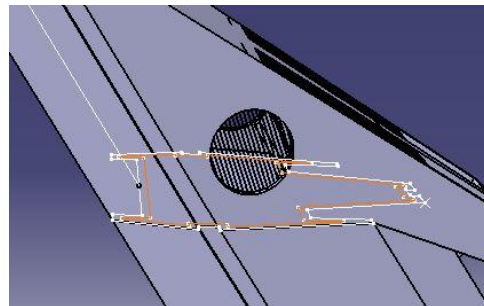


Figura 5.11. Offset.

Posteriormente se ha empleado la herramienta Pocket, definiendo una recta para definir la dirección y un plano (plano 6) que limitará el pocket mediante up to plane.

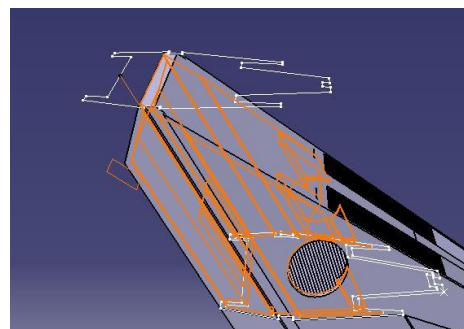


Figura 5.12. Pocket para vaciar la cabeza.

Para definir la parte frontal de la cabeza del pilono, se ha hecho un Pad a partir del sketch 8 en naranja en la figura inferior hacia los laterales.

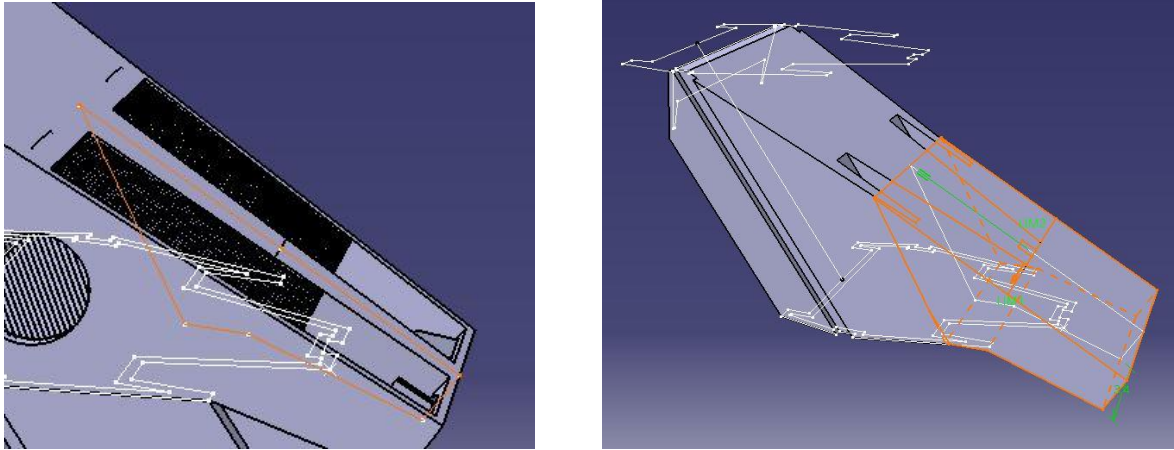


Figura 5.13. Pad parte frontal.

A continuación se han realizado dos Split, uno a cada lado de la cabeza, para obtener la inclinación de las caras laterales.

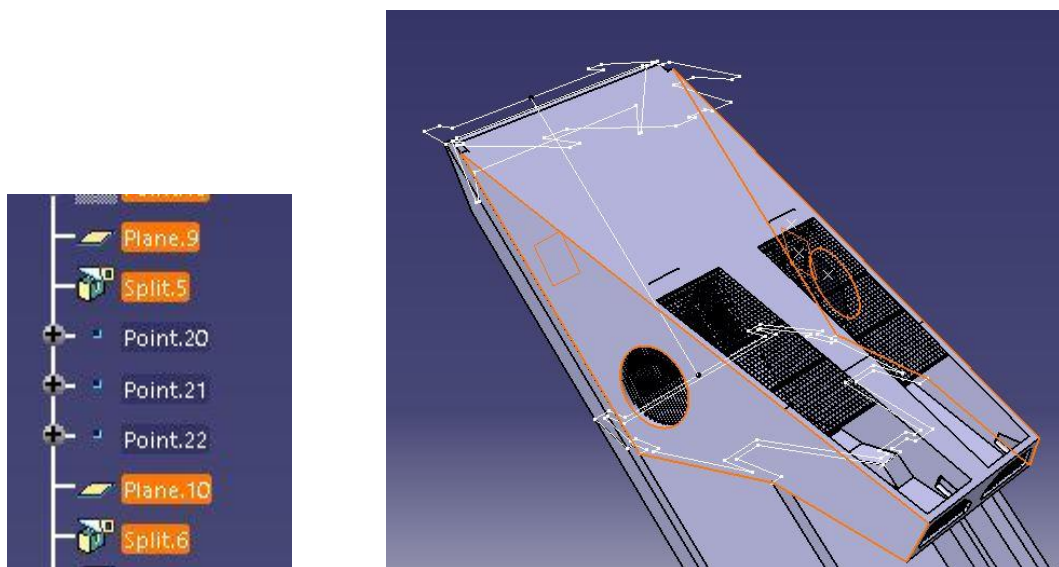


Figura 5.14. Splits laterales.

Seguidamente se han realizado 4 Pockets:

El primero para obtener los dos “ojos” de la cabeza, a través del Sketch 9, situado en el centro de la misma.

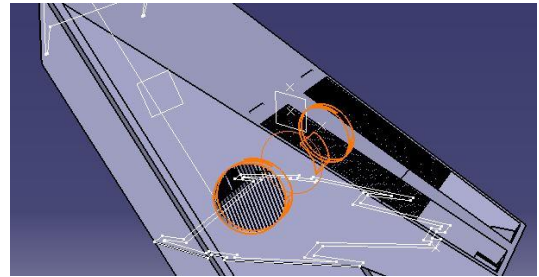


Figura 5.15. Pocket 1. Ojos

El segundo en la parte posterior, para hacer las ventanas traseras.

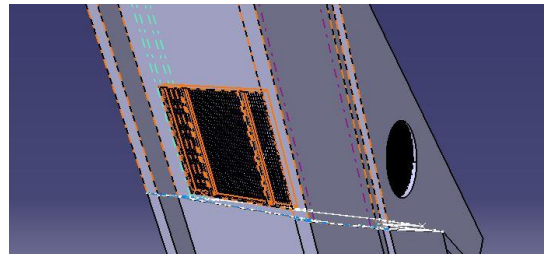


Figura 5.16. Pocket 2. Ventanas traseras.

El tercero para los huecos de la “nariz”

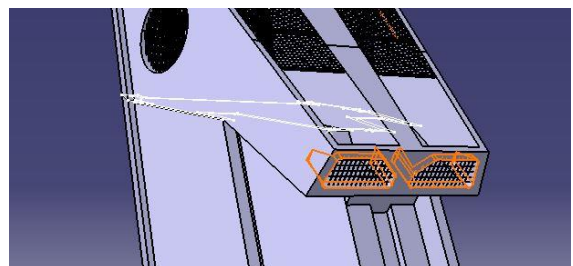


Figura 5.17. Pocket 3. Huecos inferiores.

El cuarto para las ventanas superiores

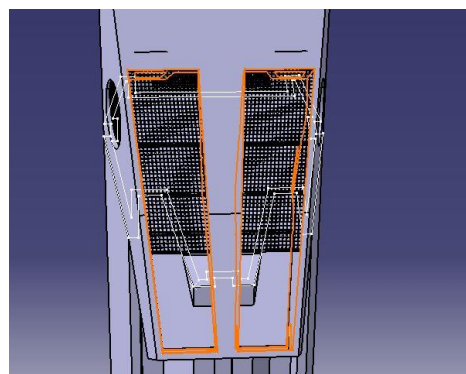


Figura 5.18. Pocket 4. Ventanas superiores.

A continuación, se han realizado diversos Pad en algunas zonas:

Zonas de la nariz

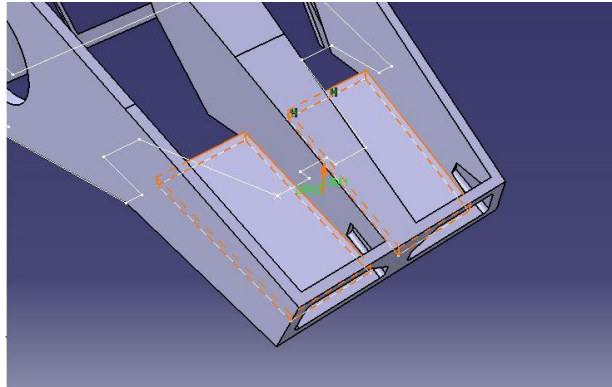


Figura 5.19. Pad nariz.

Suelo de la zona mirador

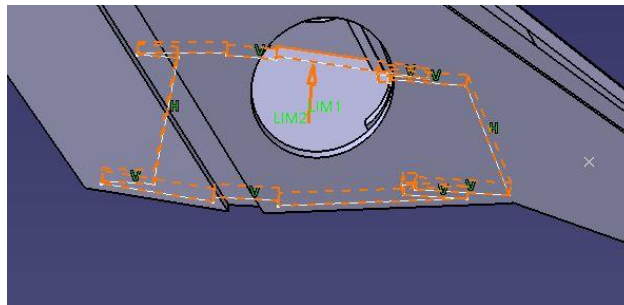


Figura 5.20. Pad base

Para completar la cabeza, se han dibujado las rejillas. Todas ellas están formadas por barras $\Phi 12 @ 0.115$ m. Para su dimensionamiento, se ha dibujado en varios sketch círculos con ese diámetro y se ha usado la herramienta Pad.

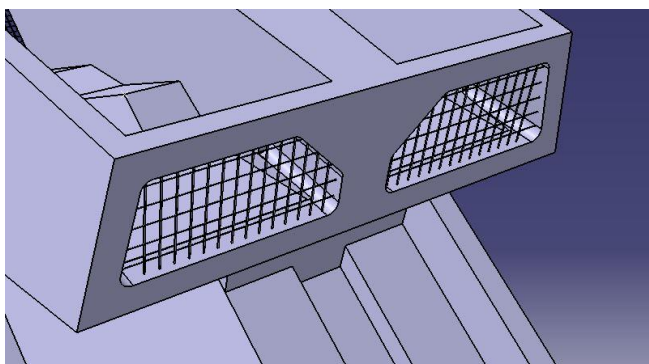


Figura 5.21. Rejillas inferiores.

En la zona superior se ha procedido igual:

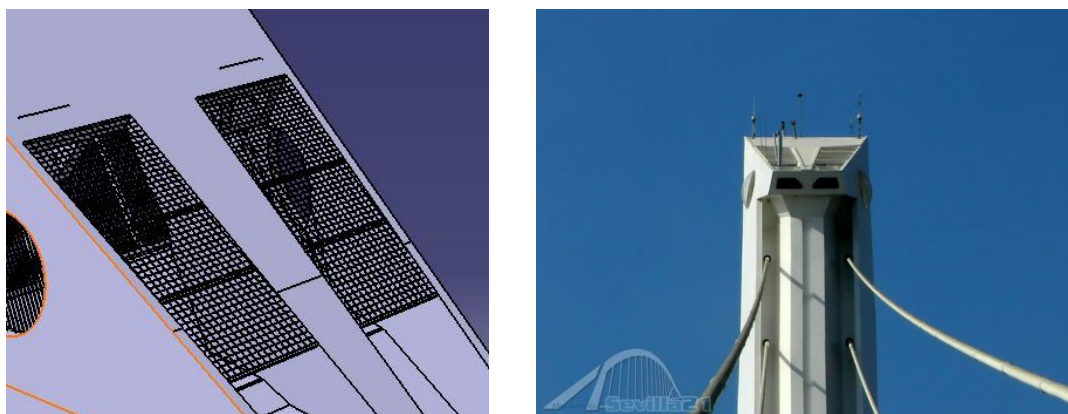


Figura 5.22. Rejillas superiores

Las rejillas de los “ojos” tienen forma esférica, pero por simplicidad se han dimensionado como planas.



Figura 5.23. Rejillas del “ojo”

La zona posterior está formada por barras horizontales de diámetro 12 mm y las verticales son de diámetro 10 mm

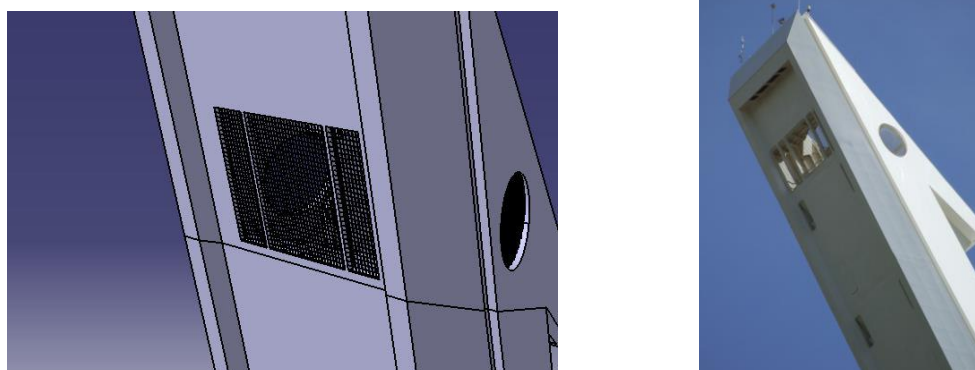


Figura 5.24. Rejillas traseras.

5.2.2 Part 2. Encepado

Teniendo en cuenta el sistema de referencia global, se han dimensionado los encepados y los pilotes.

A partir de los planos, se dibujó la sección del primer encepado y se definió un Pad de 2.25 m.

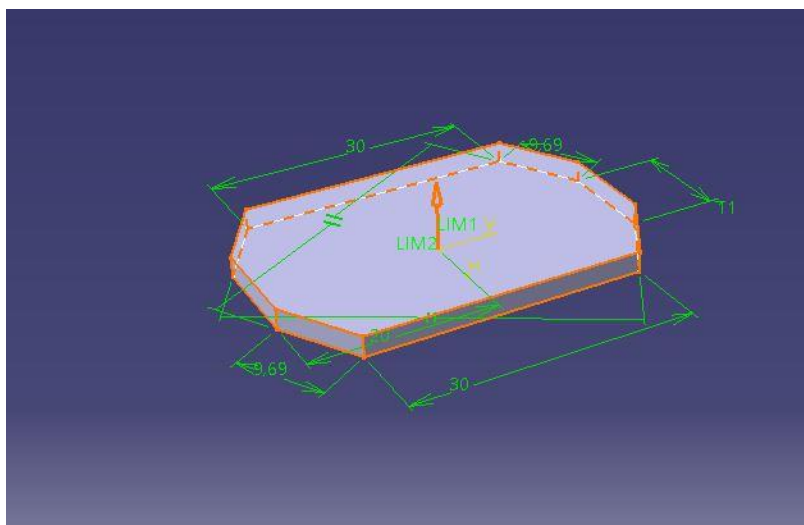


Figura 5.25. Encepado 1

Para el segundo encepado, se dibujó su sección, encima del anterior Pad y se volvió a realizar un Pad de 2.25 m.

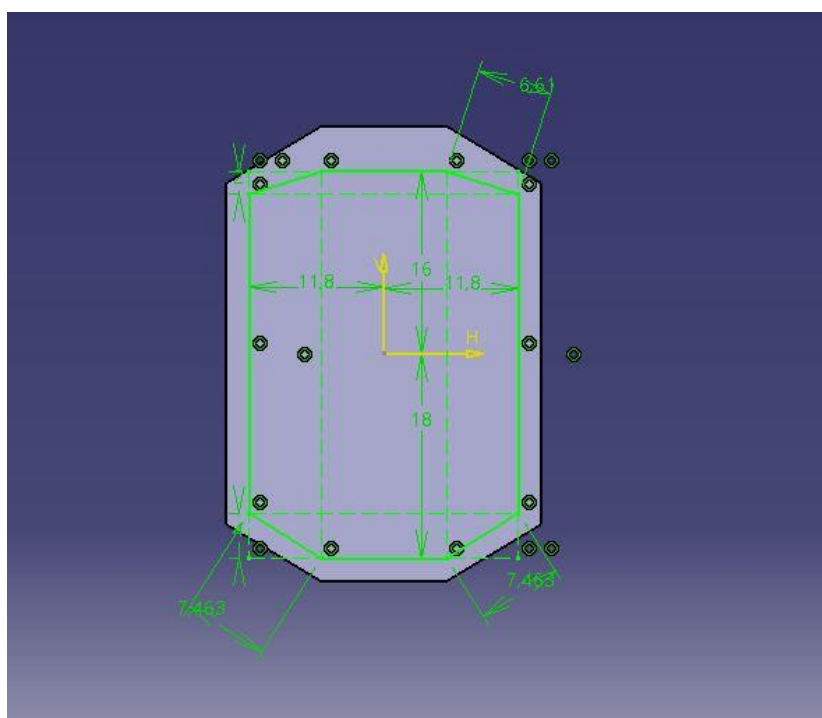



Figura 5.26. Encepado 2.

Además se han realizado chaflanes mediante la herramienta Chamfer  en los dos encepados.

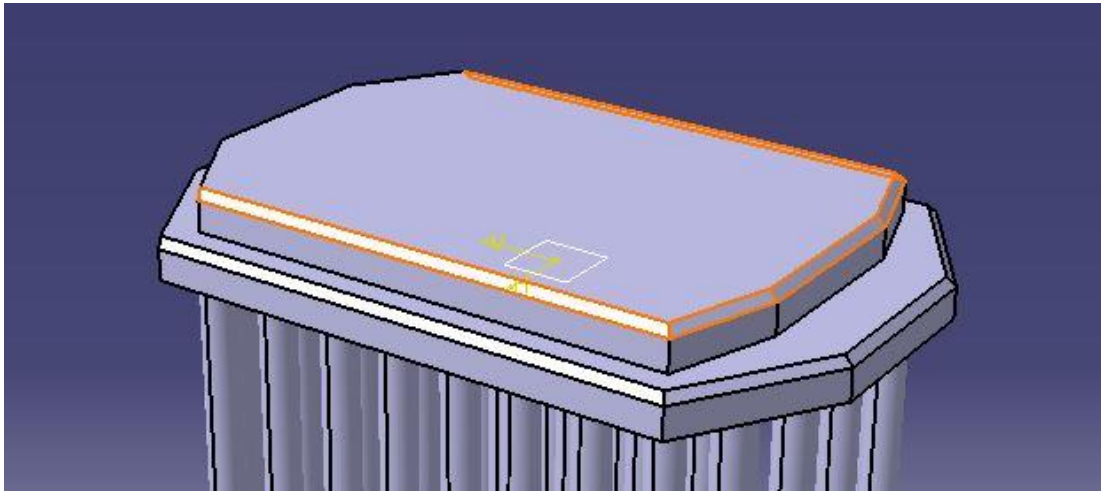


Figura 5.27. Chaflanes.

Los pilotes son todos de 2 m de diámetro y de una longitud de 46 m. Su empotramiento mínimo en las margas es $\geq 24\text{ m}$. Se han insertado en un archivo Drawing.cat conociendo su distribución gracias al plano nº 12, se han pegado en el sketch y se ha hecho un Pad.

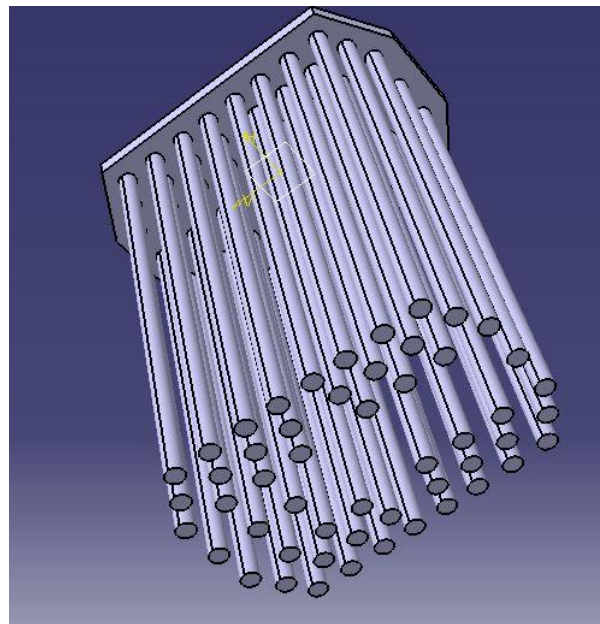
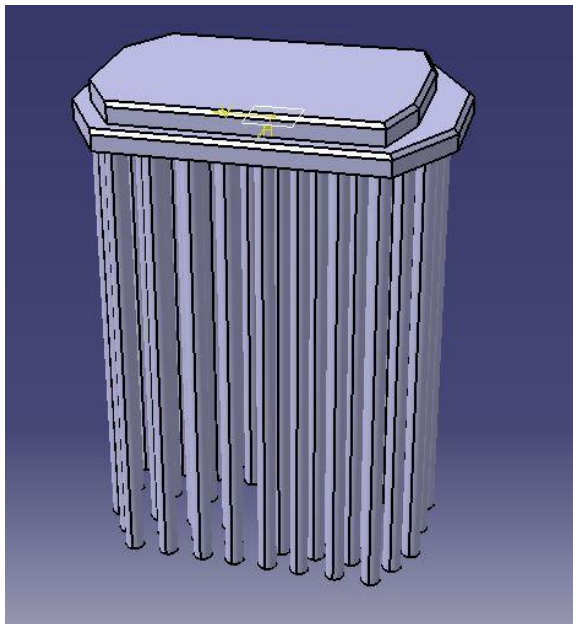


Figura 5.28. Pilotes.

5.2.3 Part 3. Basamento.

El basamento es la zona de unión del encepado con la base del pilono. Se ha dimensionado teniendo en cuenta el sistema de coordenadas global para que al insertarlo todo en el Assembly Design se posicione correctamente.

Se ha comenzado con la parte inferior. En primer lugar se ha hecho un Pad del siguiente sketch para después hacer varios Pockets y dos chaflanes en las esquinas.

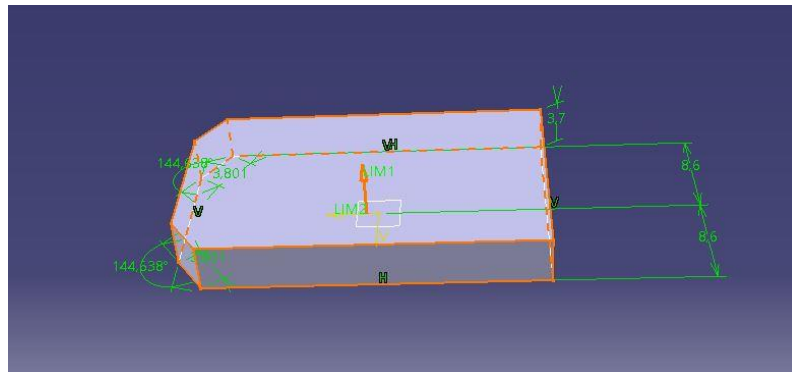


Figura 5.29. Pad 1 basamento.

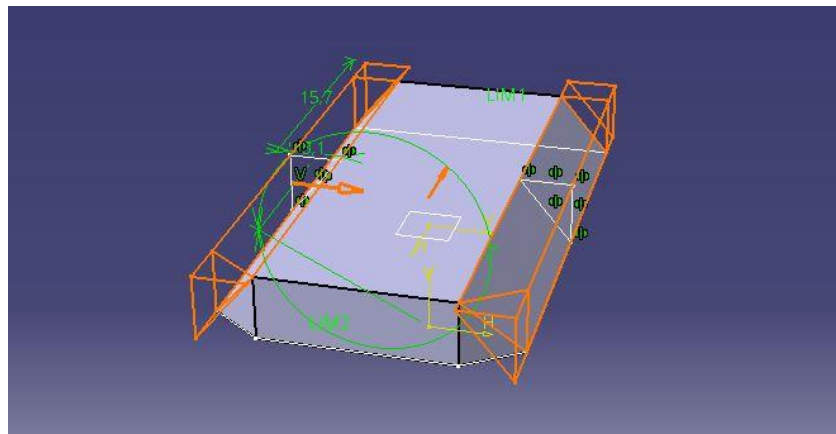


Figura 5.30. Pocket 1 basamento.

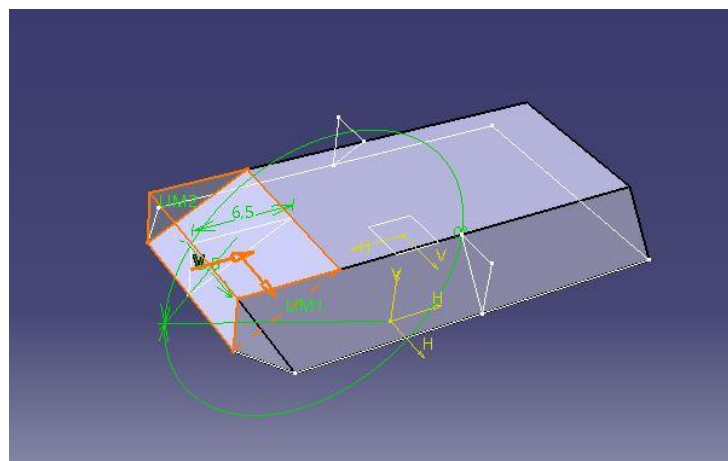


Figura 5.31. Pocket 2 basamento.

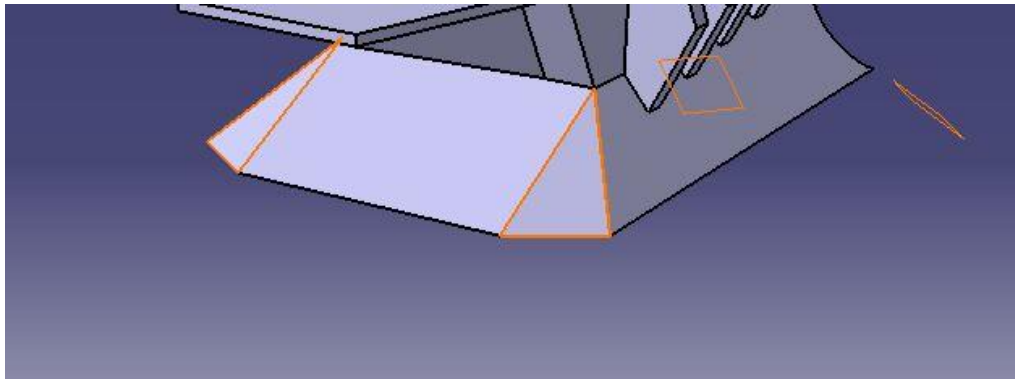


Figura 5.32. Chaflanes basamento.

La parte más pegada al río, que tiene forma curva, tal y como se puede apreciar en el detalle A del plano nº 6, se ha dimensionado con un Pocket insertando esta sección a partir de AutoCad.

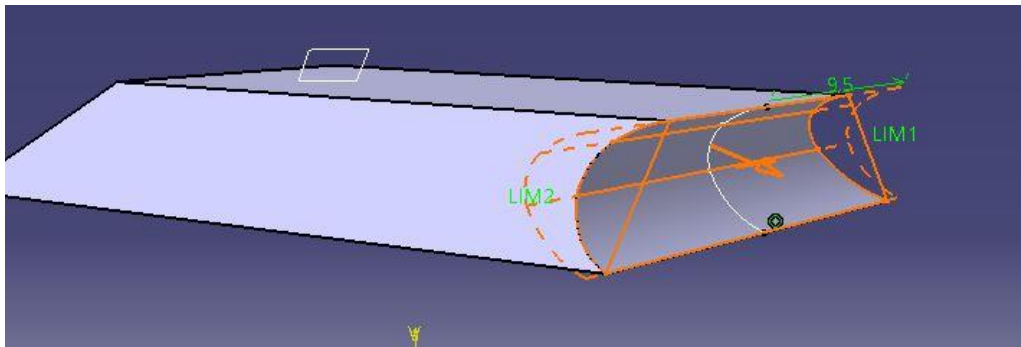


Figura 5.33. Pocket zona curva.

Para el siguiente nivel, se han dibujado varios Sketchs con las secciones correspondientes y se ha vuelto a usar la herramienta Pad.

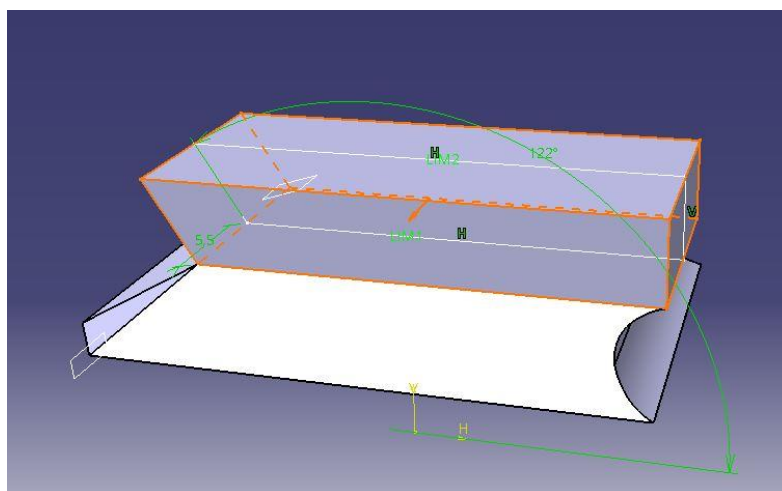


Figura 5.34. Pad superior 1.

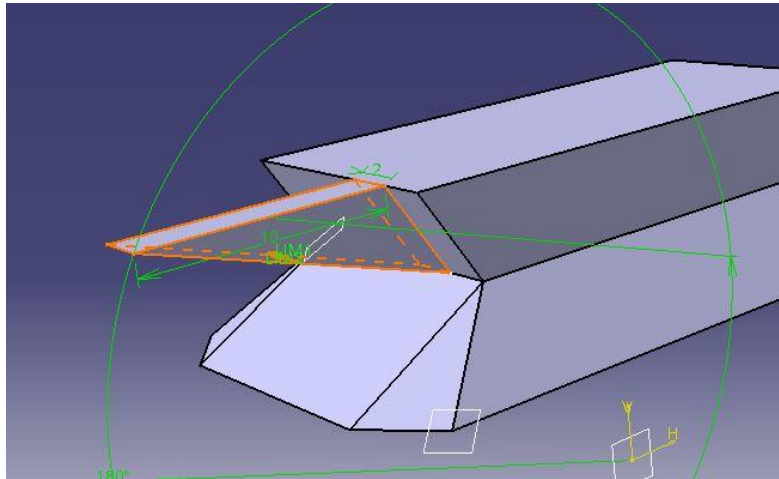


Figura 5.35. Pad superior 2.

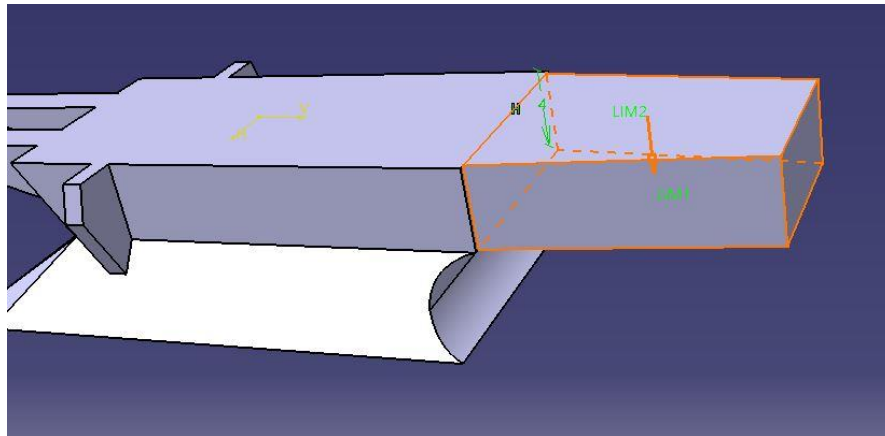


Figura 5.36. Pad superior 3.

Para los detalles laterales se ha procedido igual, se ha dibujado la sección en un sketch y se ha hecho un Pad con la dimensión correspondiente.

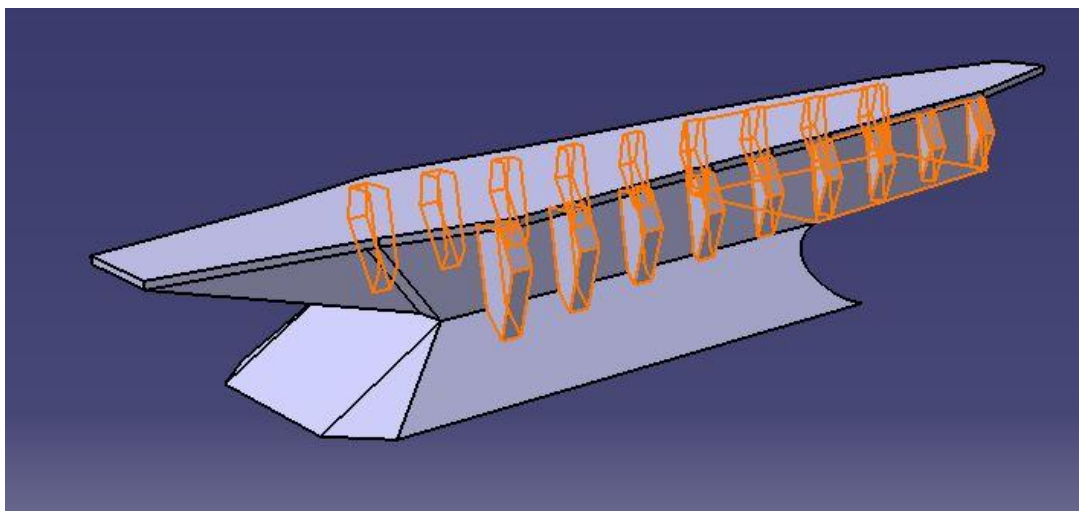


Figura 5.37. Pad laterales.

Y lo mismo para la zona superior.

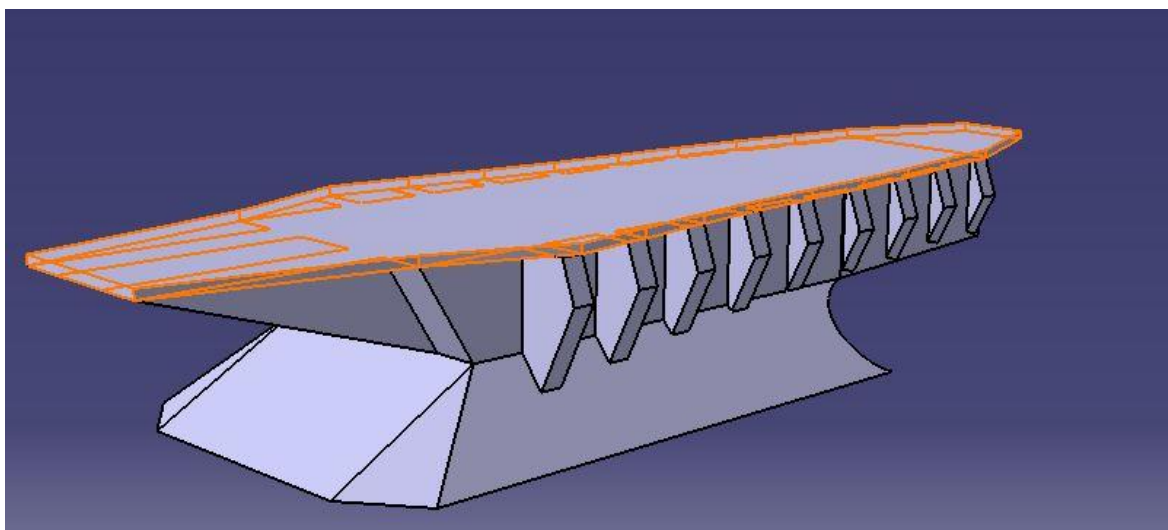


Figura 5.38. Pad losa superior.

Resultado:

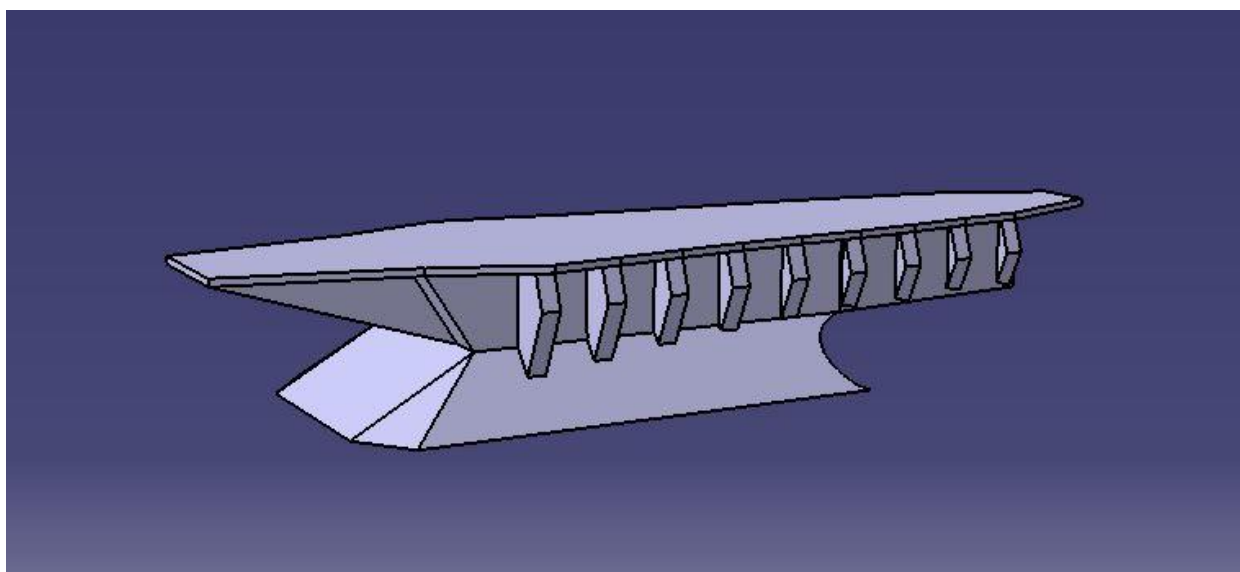


Figura 5.39. Basamento en Catia. Vista global.

5.2.4. Part 4. Unión pilono con basamento.

Como tenemos las secciones de las dovelas 3 y 0 se ha hecho uso en primer lugar de la herramienta Multi Solid Section, igual que en el dimensionamiento del pilono.

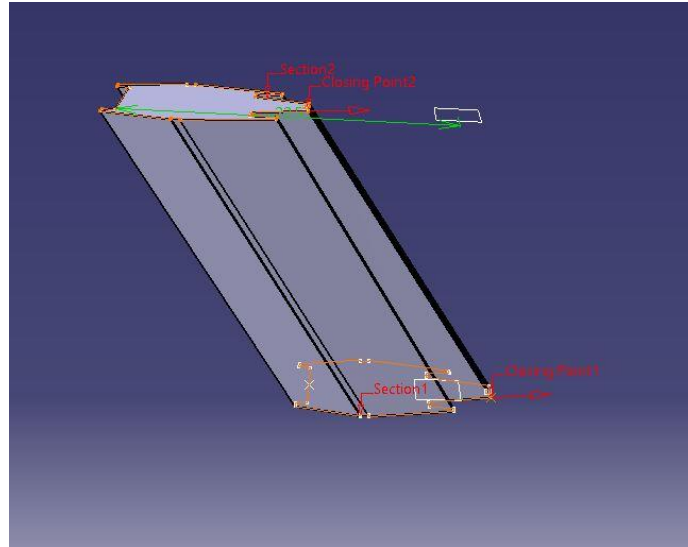


Figura 5.40. Pad inicial.

Los detalles de unión del pilono con la plataforma, que en el plano nº 6 se pueden apreciar el radio de los arcos, se han modelado introduciendo la sección en un sketch y realiendo un Pad.

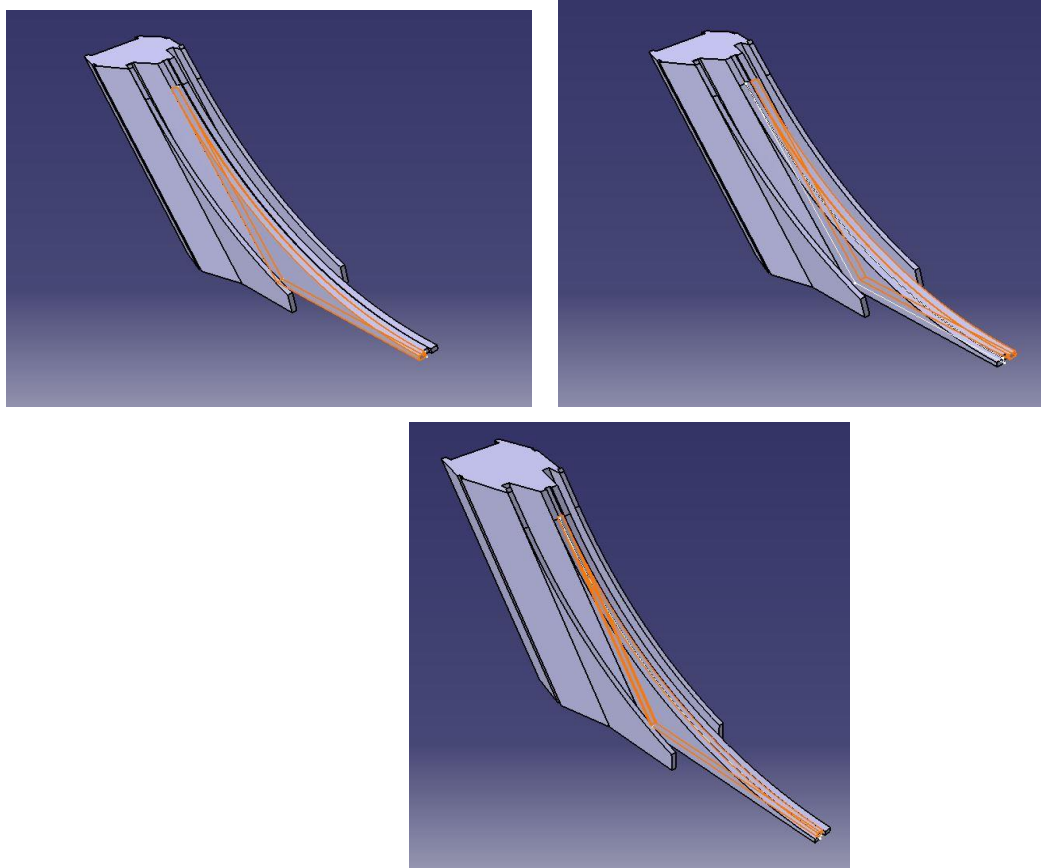


Figura 5.41. Pad detalles pilono.

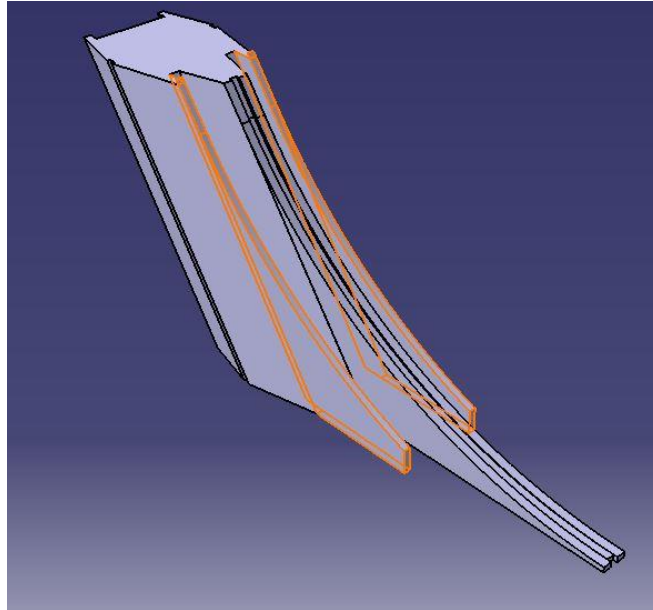


Figura 5.42. Detalles 2 pilono.

También se ha dimensionado la puerta trasera que da acceso a las escaleras para subir a la cabeza del pilono mediante un Pocket.

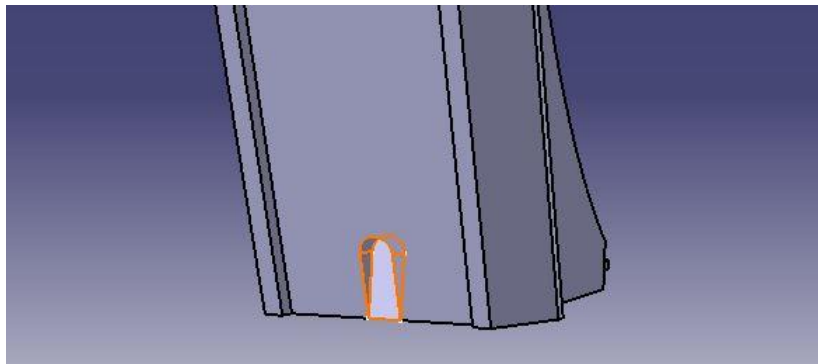


Figura 5.43. Puerta trasera en Catia y en la realidad.

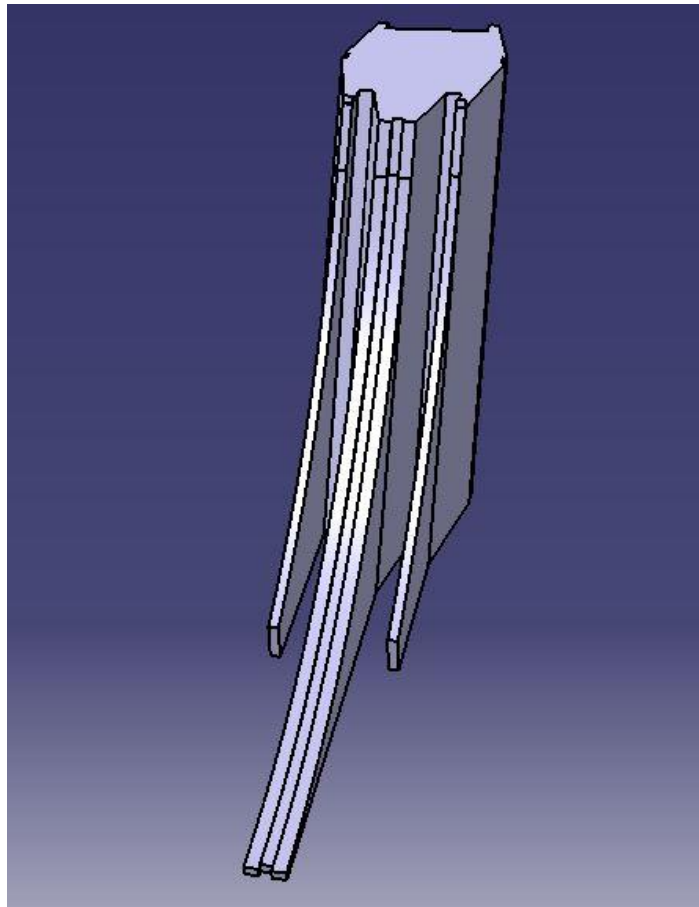


Figura 5.44. Vista detalle inferior Pilono en Catia y en la realidad.

5.2.5 Part 5. Tablero I. Viga hexagonal y tablero recto.

El tablero del puente está constituido por una zona peatonal, la viga hexagonal y unas costillas, vigas transversales, sobre la que se sitúa el tablero para la circulación del tráfico rodado. Estas costillas se dimensionarán en otro part.

Para el dimensionamiento de la viga, se ha procedido dibujando la sección y haciendo un Pad. El puente tiene una pendiente del 1% pero por simplicidad se ha considerado recto.

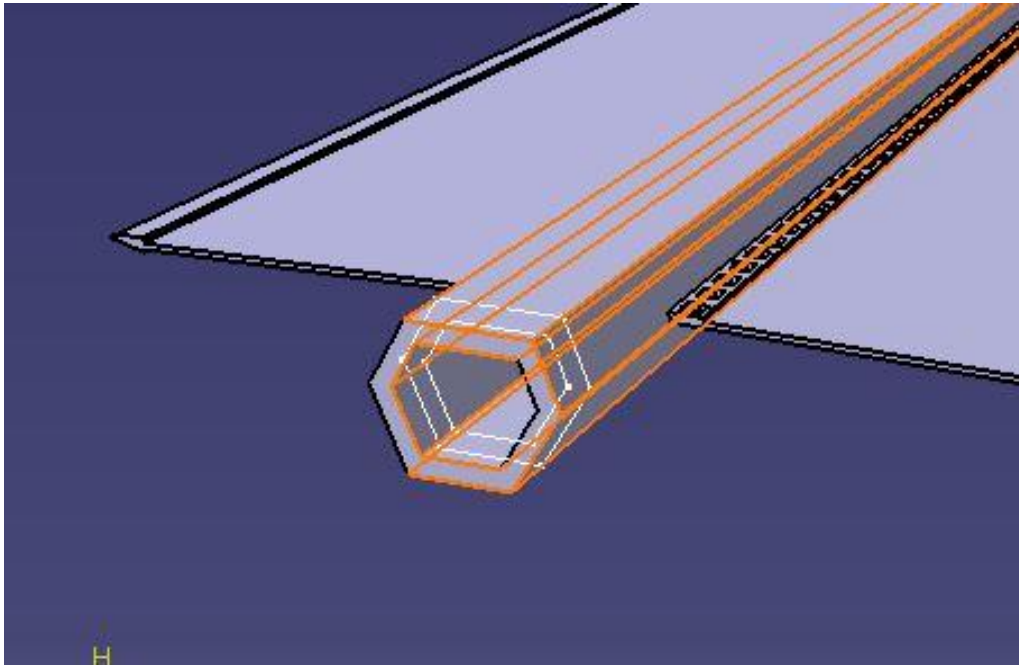


Figura 5.45. Viga central.

Para la zona del tablero recta, se ha procedido igual un Pad a partir de la sección transversal. Además se ha utilizado la herramienta Mirror para hacer el tablero al otro lado de la viga.

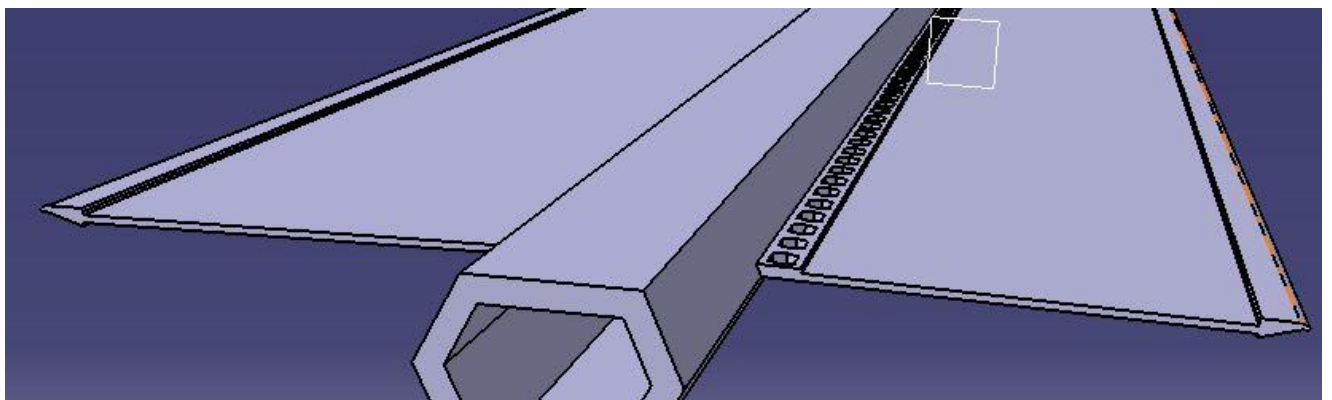


Figura 5.46. Viga y tablero en Catia.

Mediante Pocket se han dimensionado los huecos que aparecen en el extremo del tablero. Se ha partido del Sketch de un elemento, se ha obtenido el resto de la serie con la orden Traslate (copia múltiple) y finalmente se ha realizado una simetría de un lado para obtener el otro.

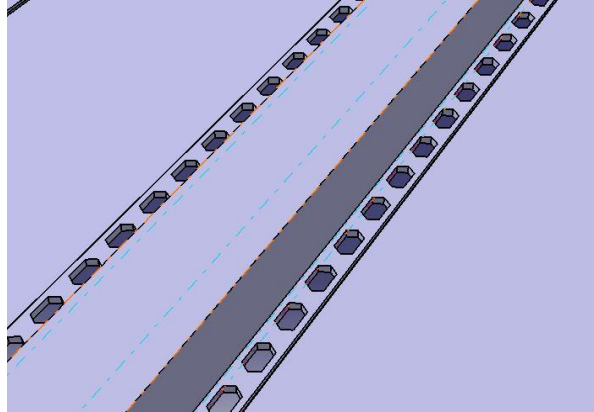


Figura 5.47. Huecos extremos del tablero en Catia y en la realidad.

Sketch y Pad para dimensionar el estribo de Torneo.

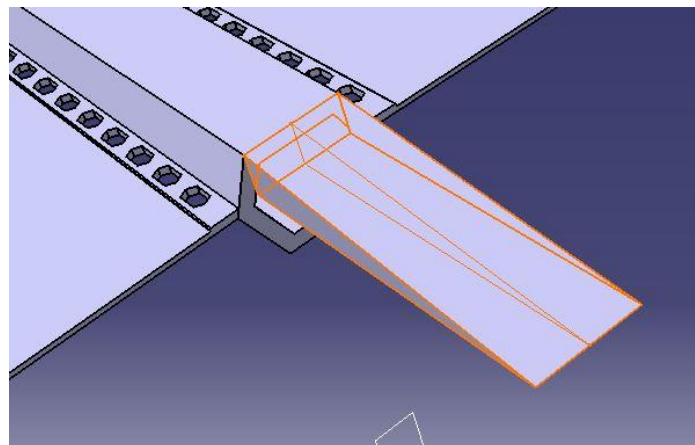


Figura 5.48. Rampa de acceso a la plataforma peatonal desde la rotonda de Torneo.

5.2.6 Part 6. Tableros curvos

Como no se ha podido obtener planos en planta del puente, no se podía saber con exactitud el radio de la curva que forma el tablero. Por ello se ha realizado un Rib con Sketch perfil la sección transversal del tablero y como guía una recta curva aproximada mediante Spline. Además se ha usado Mirror para obtener el otro simétrico.

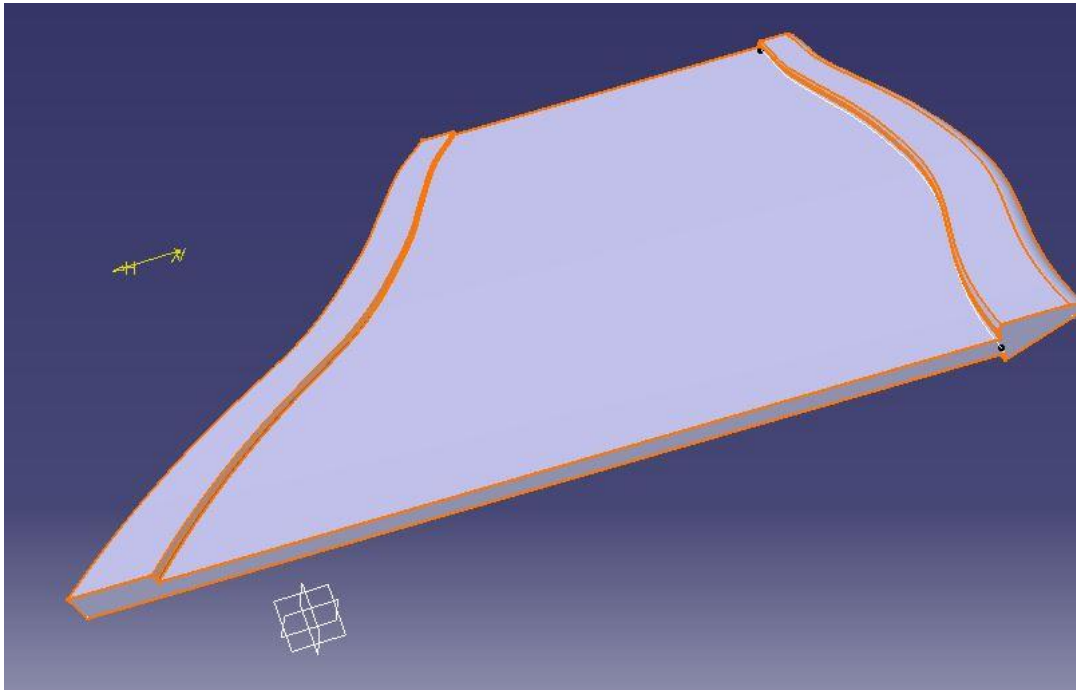


Figura 5.49. Tablero curvo.

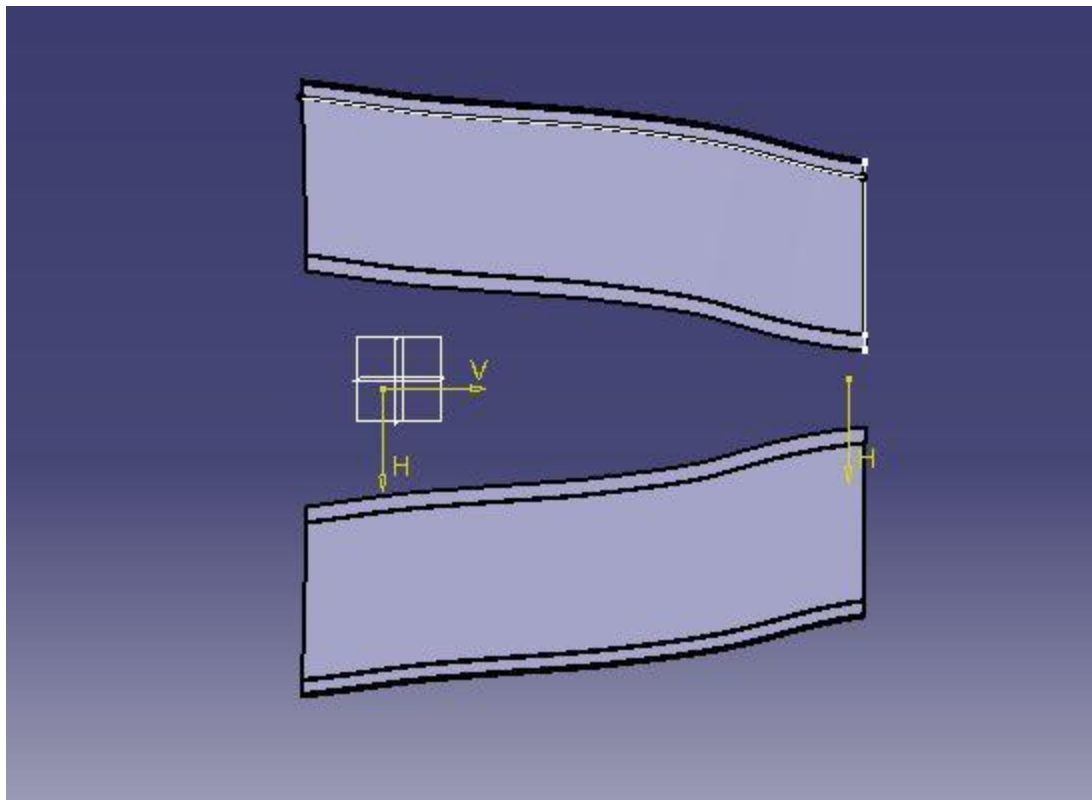


Figura 5.50. Tableros curvos.

5.2.7 Part 7. Tirantes.

La inclinación de todos los tirantes es de 25° , por lo que en un sketch con la inclinación adecuada se han dibujado las secciones circulares de los tirantes con el diámetro indicado: cada pareja de tirantes está formada por 60 torones de 0.6'' de diámetro cada uno, salvo los que constituyen la última pareja, de 292 m de longitud, que está formada por 45 torones de 0.6''.

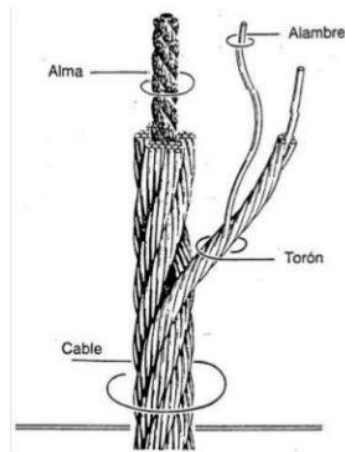


Figura 5.51. Torón

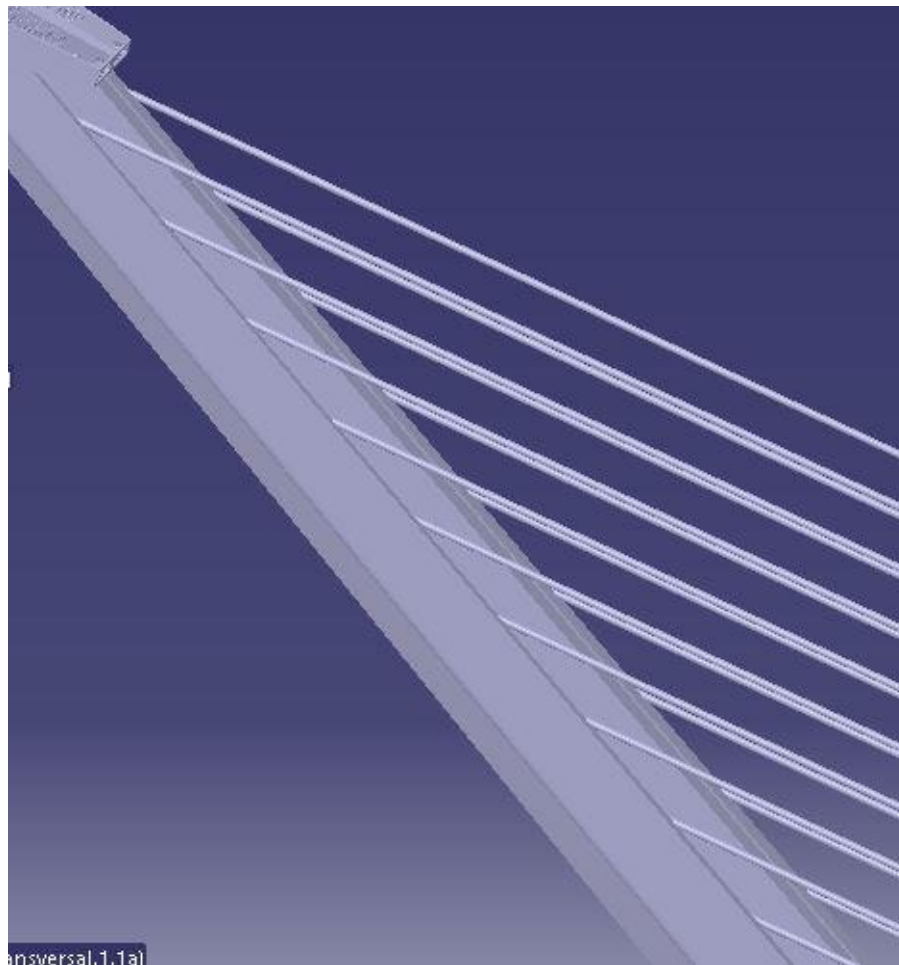


Figura 5.52. Tirantes. Unión con pilono.



Figura 5.53. Tirantes. Unión con pilono 2.

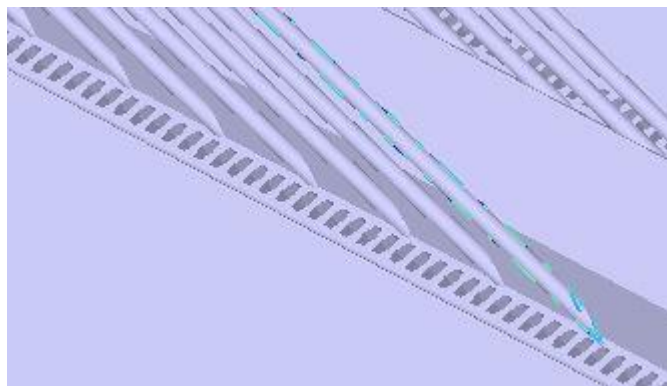


Figura 5.54. Tirantes. Unión con viga central.

5.2.8 Part 8. Costillas: vigas transversales.

Se ha modelado una viga en único Part construyéndola mediante chapones de acero uniendo las distintas partes: ala superior, ala inferior, alma, cartelas de refuerzo en las esquinas, etc. Destacar que en los planos proporcionados por la Consejería de Fomento y vivienda no aparecía el hueco de la zona más cercana a la viga hexagonal, por lo que se ha estimado mediante fotografías.

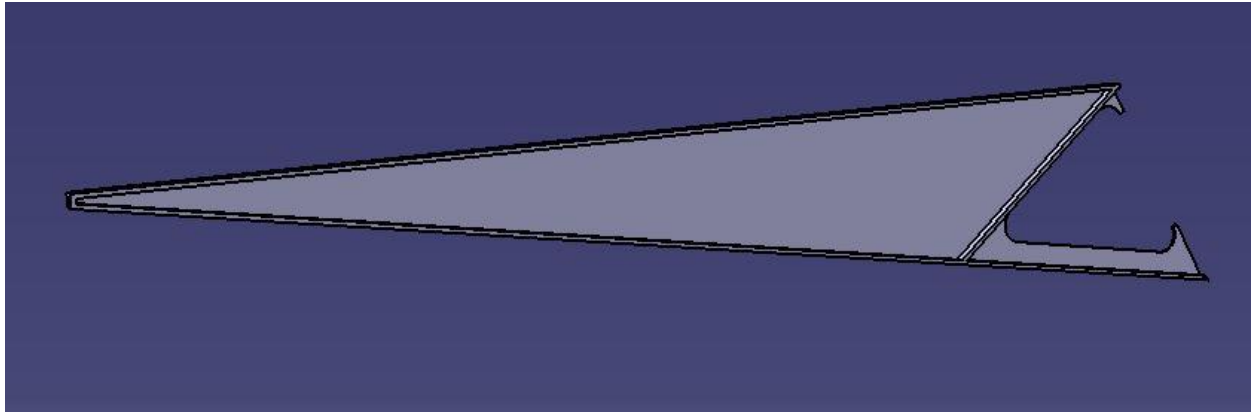


Figura 5.55. Viga transversal.



Figura 5.56. Detalle vigas transversales.

Una vez obtenida esta viga tipo, se ha generado su simétrica respecto al plano vertical de simetría del puente y a ambos elementos se le ha aplicado una matriz (Rectangular Pattern) de 42 elementos y una longitud igual a la cubierta por el conjunto de vigas ménsulas, en el sentido longitudinal del puente.

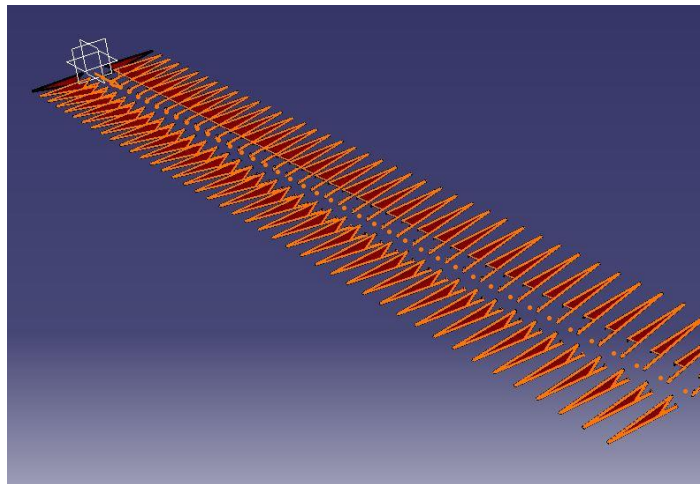


Figura 5.57. Vigas transversales en Catia.

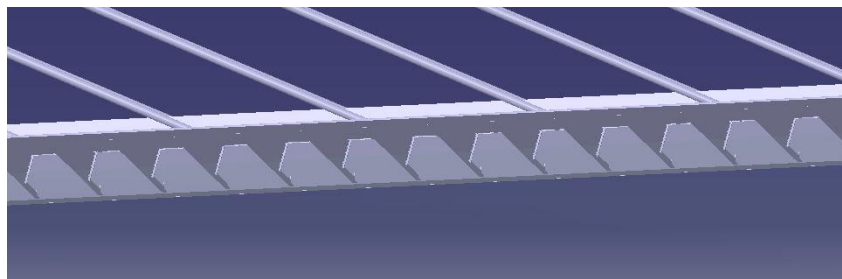


Figura 5.58. Vigas transversales en Catia y en la realidad.

5.2.9 Part 9 y 10. Lecho y agua

Para completar el modelo, se ha dimensionado el terreno y el río.

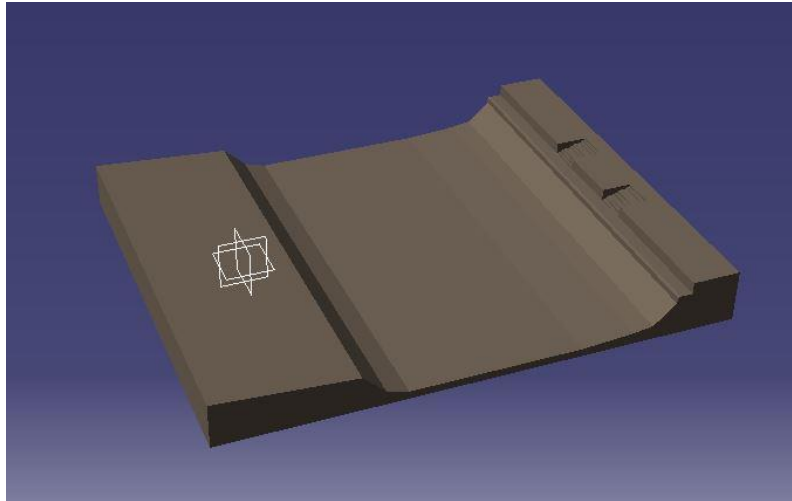


Figura 5.59. Lecho del río.

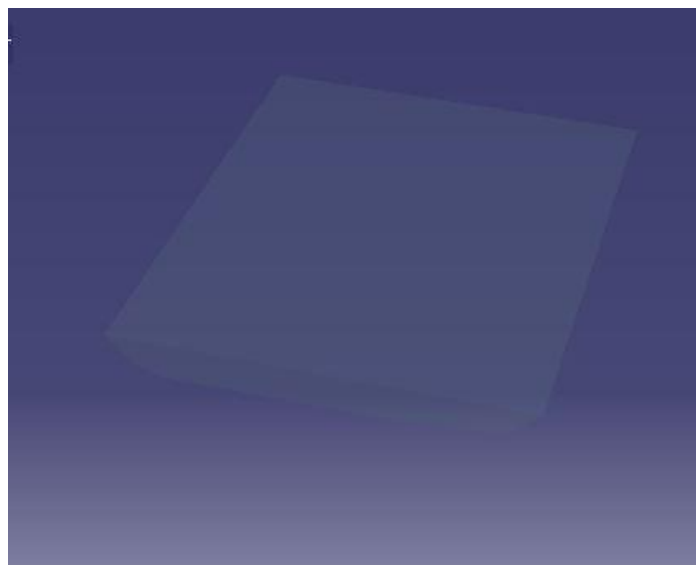


Figura 5.60. Agua del río

5.2.10 Assembly Design. Puente ensamblado.CATProduct

Vista global conjunto.

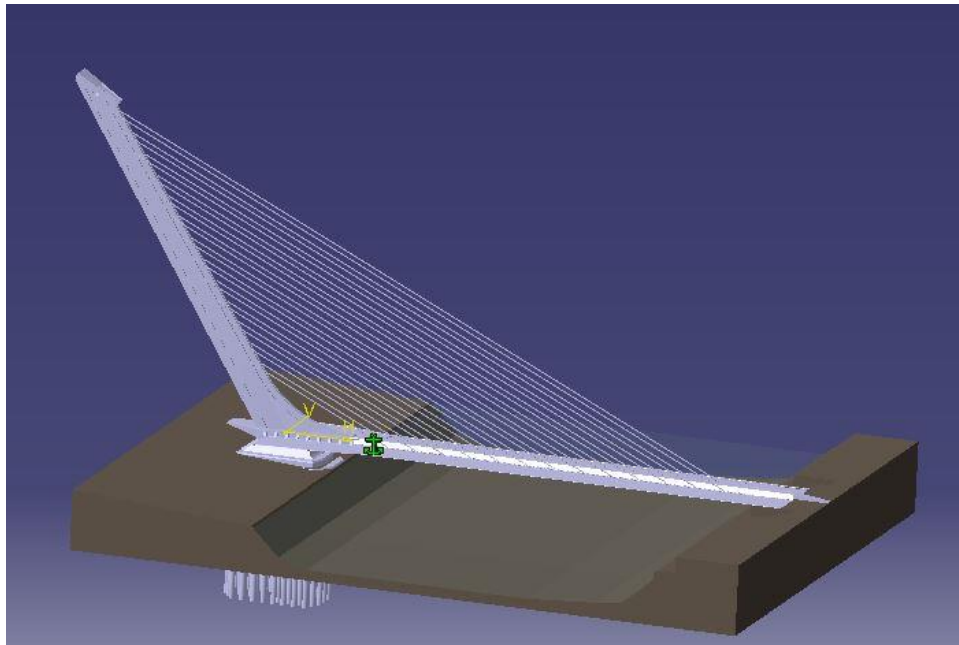


Figura 5.61. Puente vista global.

Se ha empleado la herramienta Render (Photo Studio Easy Tools) para obtener una imagen más realista.

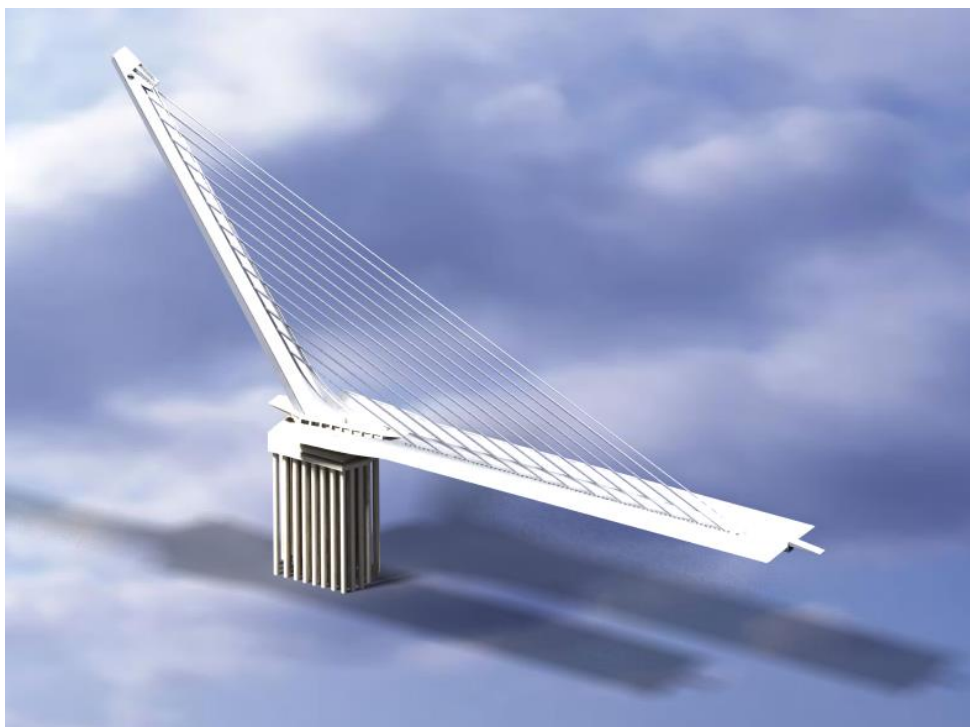


Figura 5.62. Puente vista global con la opción Render.

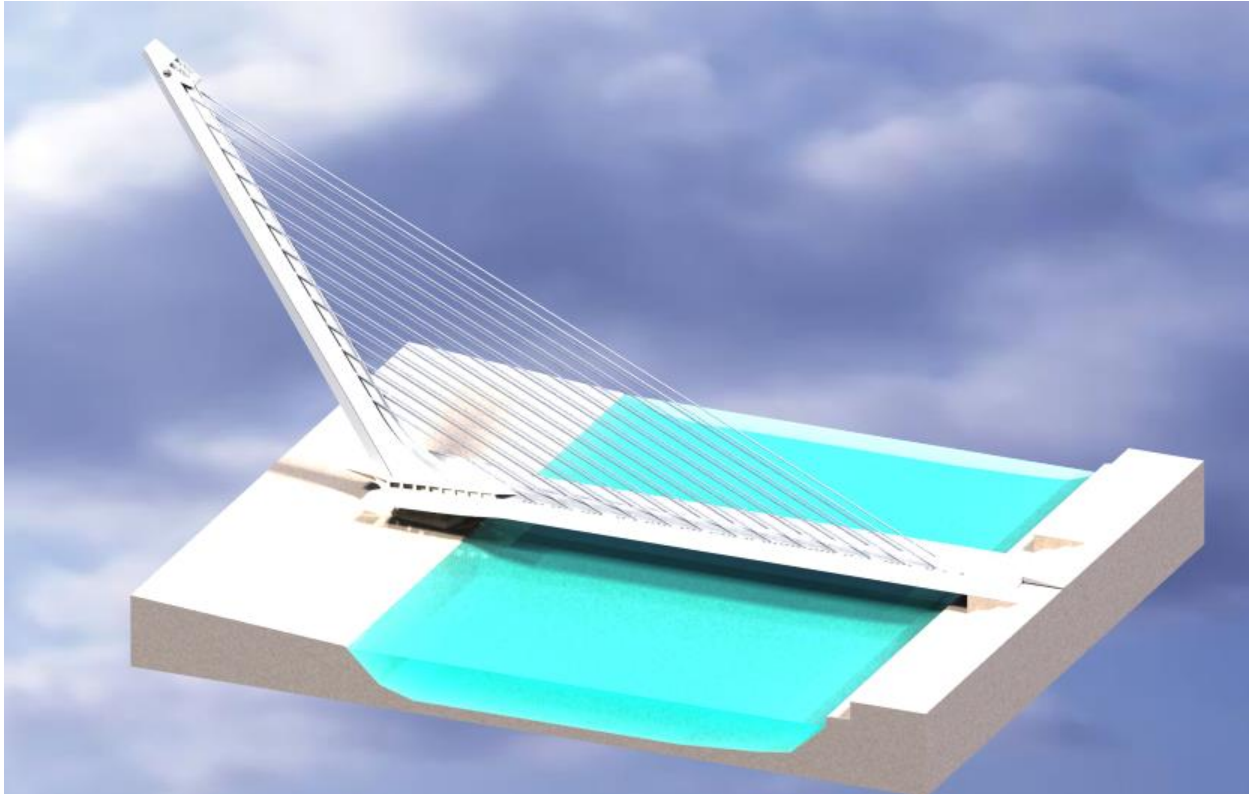


Figura 5.63. Puente vista global en Catia y en la realidad 1.



Figura 5.64. Puente vista global en Catia y en la realidad 2.

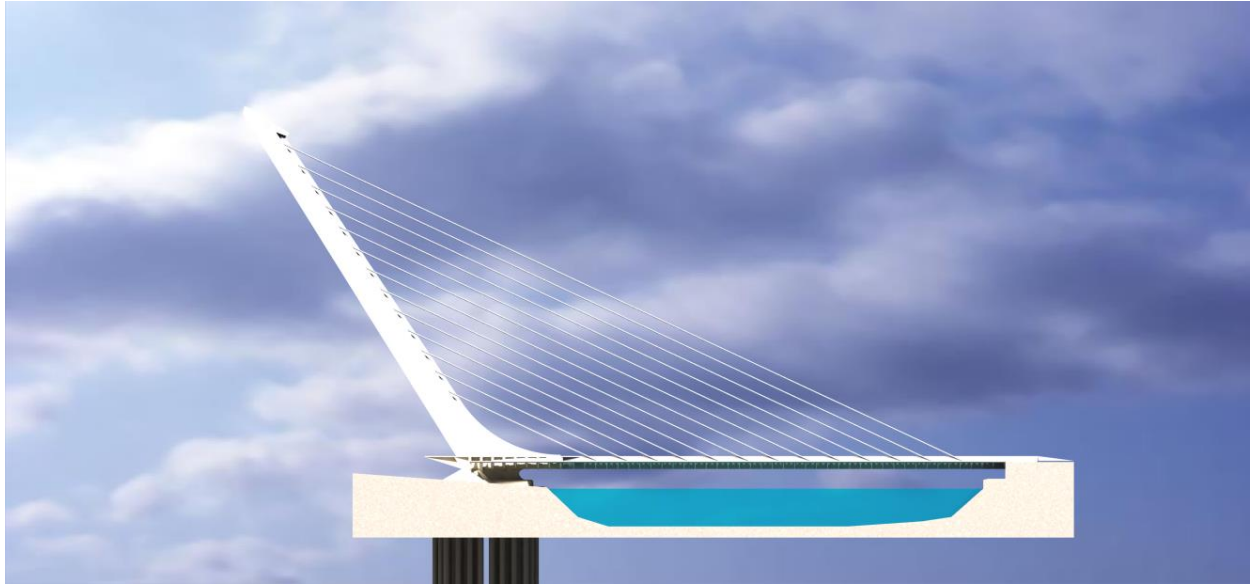


Figura 5.65. Puente vista global en Catia y en la realidad 2.

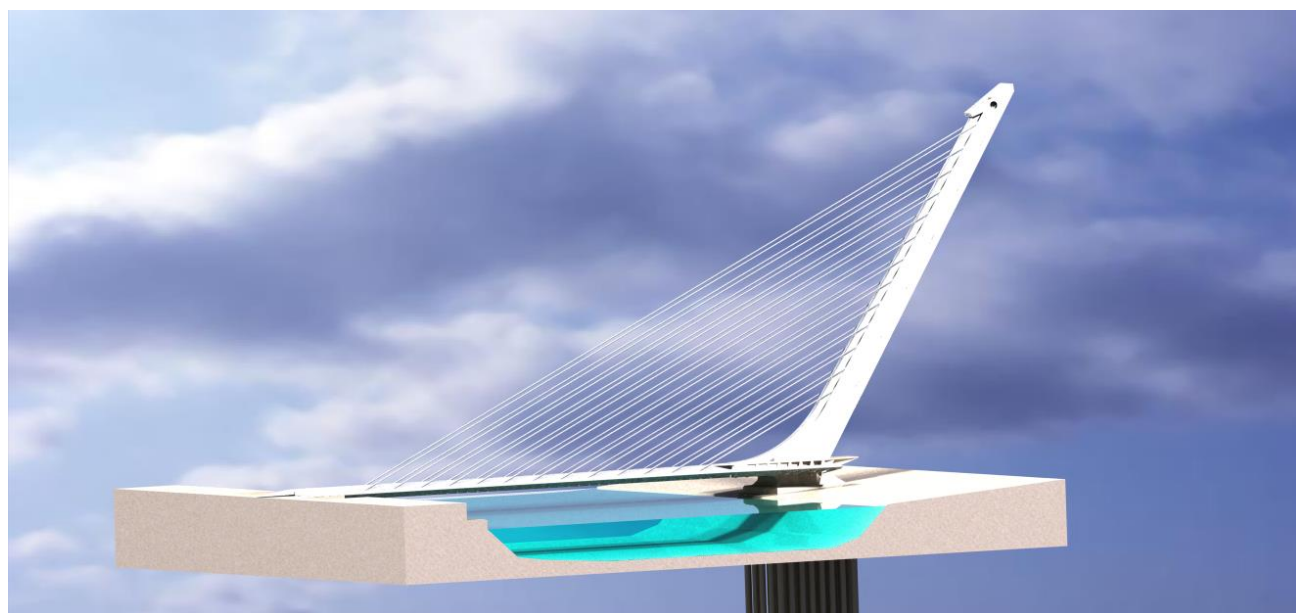


Figura 5.66. Puente vista global en Catia y en la realidad 3.

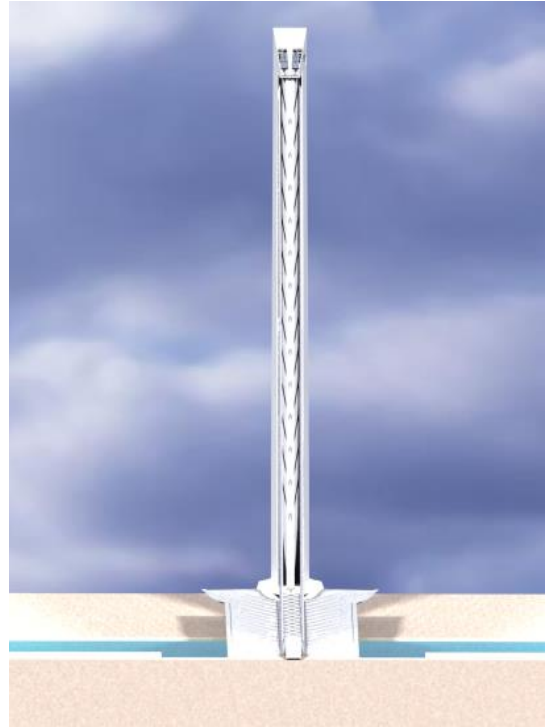


Figura 5.67. Puente vista global en Catia y en la realidad 4.

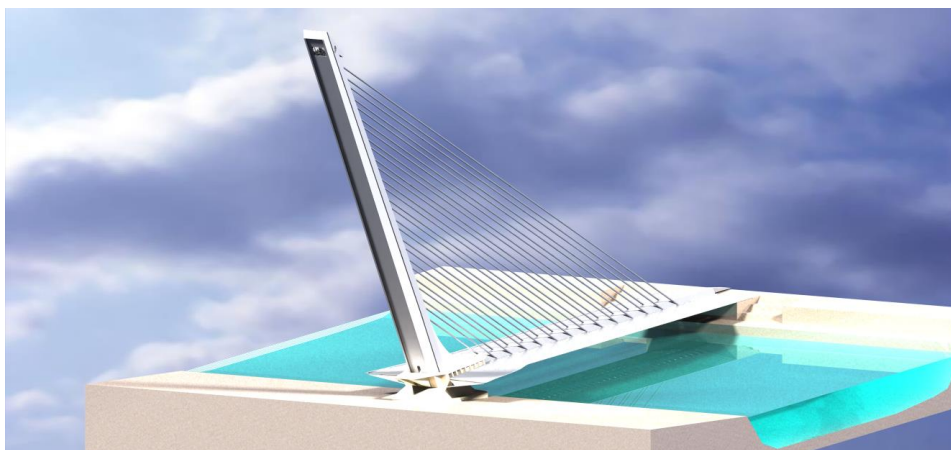


Figura 5.68. Puente vista global en Catia y en la realidad 5.

Además en el terreno se ha dimensionado las escalinatas que bajan desde Torneo al paseo Rey Juan Carlos I.

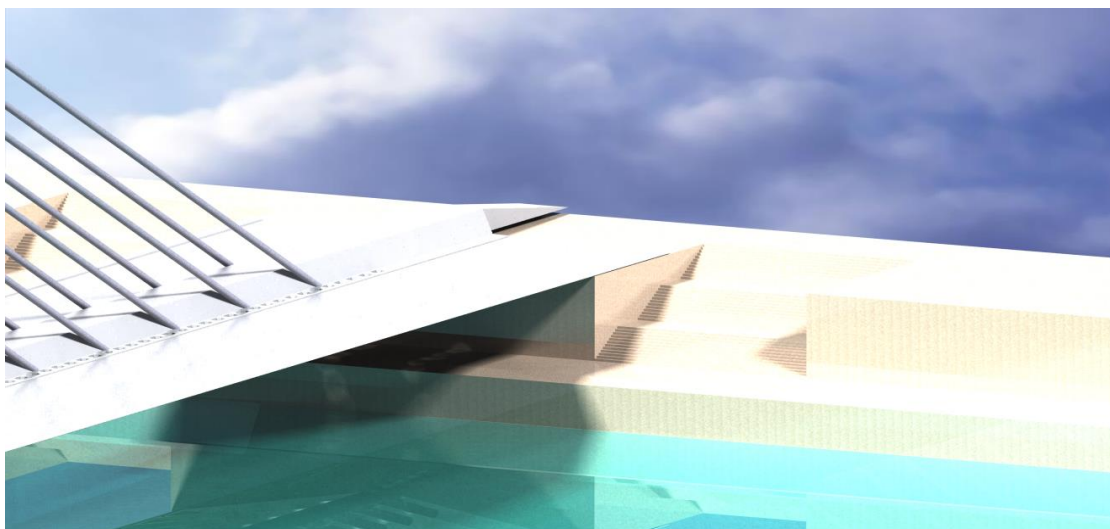
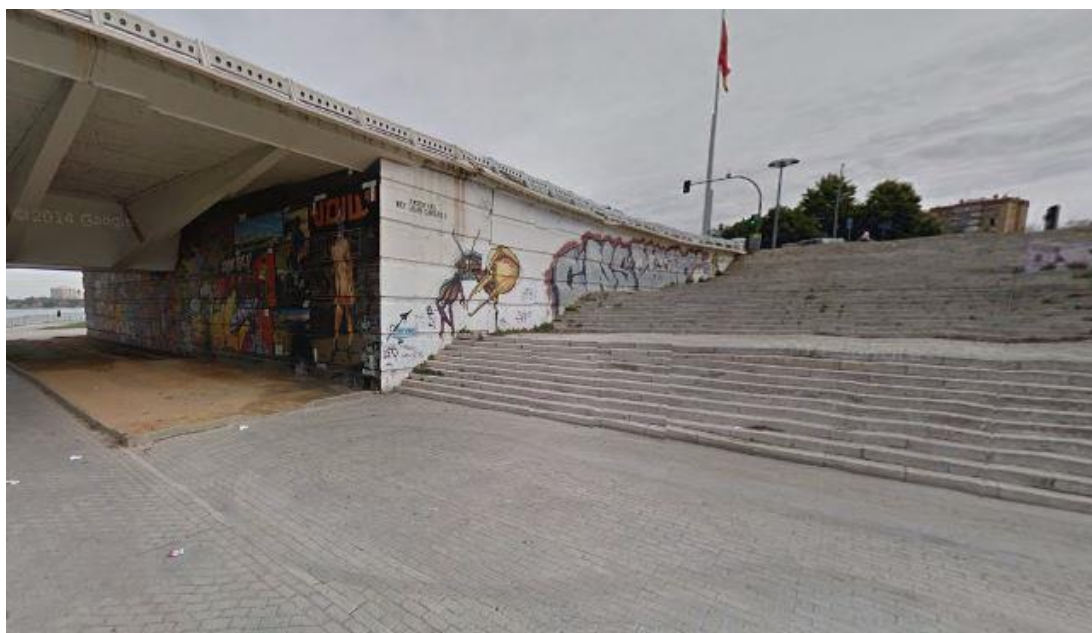


Figura 5.69. Escalinatas que bajan desde Torneo en la realidad y en Catia v5.

5.3. Proceso constructivo

El proceso constructivo elegido para la ejecución del tablero y mástil fue una de las decisiones más difíciles de tomar por parte de todo el equipo técnico que intervino en el Proyecto. Además, estuvo condicionado de una forma muy importante por el propio plazo de finalización de la obra, antes de la inauguración de la Exposición Universal de Sevilla.

5.3.1 Tablero

Para colocar los tirantes en el mástil, se precisaba que la construcción del tablero estuviese lo suficientemente avanzada para, de este modo, disponer del peso necesario que permitiera el tesado de los mismos. Por tanto se planteó la necesidad de sustentar el tablero sobre apoyos provisionales, permitiendo, a la vez, independizar los trabajos de construcción del tablero y mástil.

Al ser el cauce antiguo del Guadalquivir una dársena, se pudo realizar un relleno de la misma y efectuar los trabajos, tanto de colocación de los apoyos como de montaje del tablero, desde tierra y, con posterioridad abrir nuevamente el antiguo cauce. Además se disponía de un acceso a la obra desde la margen de Sevilla y, eventualmente, serviría de acceso a la Isla de la Cartuja para los trabajos de construcción de la Exposición Universal.

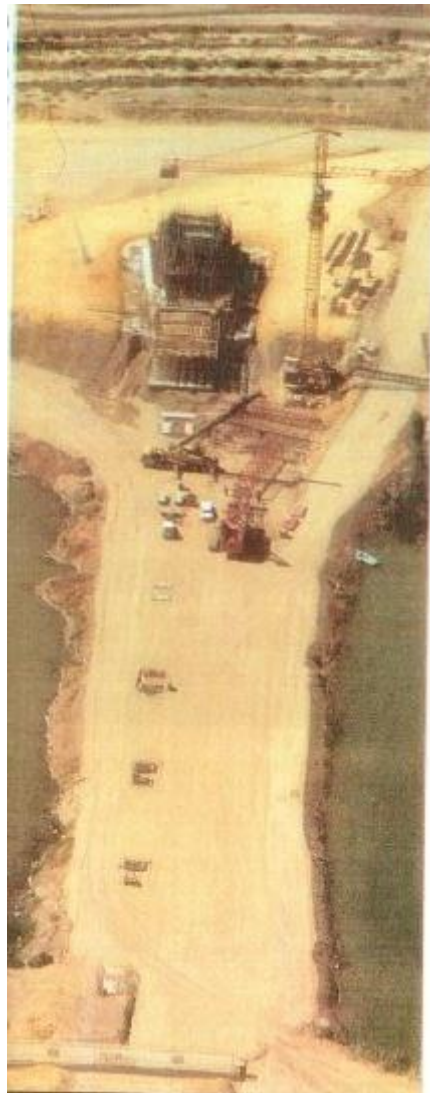


Figura 5.70. Plataforma sobre la que se construyó el puente.

El montaje del cajón metálico se realizó dividiéndolo en 6 dovelas de 24 metros de longitud y dos dovelas de 9.5 m y 21.3 m, la primera y la última.



Figura 5.71. Construcción del Puente del Alamillo. Colocación de las dovelas.

Una vez montados los cajones, se procedió a la unión soldada de los mismos mediante soldadura manual al arco eléctrico con electrodo básico de bajo contenido en hidrógeno. A la vez que se procedía a la unión de los carriles metálicos, se ejecutaba la colocación de las costillas metálicas, las placas prefabricadas de homirgón y al hormigonado de la losa superior, tanto en la zona peatonal como en la zona de paso del tráfico.



Figura 5.72. Viga central hexagonal.



Figura 5.73. Vigas transversales.

La unión del tablero metálico con la parte inicial de hormigón armado se realiza mediante una transición dentro del propio tablero metálico, de forma que las compresiones de la chapa se transmitan correctamente al hormigón. La longitud de transición es de 40 metros en el forjado inferior, 8 metros en el forjado superior y 12 metros en las almas.



Figura 5.74. Construcción basamento.

La cimentación del puente se ha realizado mediante 54 pilotes de 2 metros de diámetro empotrados 26 metros en las margas y con una longitud total de 47.5 metros. Su distribución en el encepado se puede ver en el plano nº 12.

5.3.2 Mástil

Inicialmente estaba previsto ejecutar el mástil en hormigón armado mediante encofrado trepante. Esta forma de ejecución presentaba serios problemas de plazo debido a la dificultad de colocación de las barras dentro de la sección de hormigón; había que pensar que el número de barras de diámetro 32 mm en la sección de arranque era de 794 más un número importante de barras de diámetro 20 mm además de toda la armadura a cortante y rasante.

Debido a esto se pensó en sustituir las barras por chapa de acero dispuesta en el contorno y conectada al hormigón mediante los propios rigidizadores, los pernos y los cercos interiores. Esta solución presentaba la ventaja de que la chapa, además de su misión resistente, nos sirve de encofrado. Por tanto, la solución adoptada ha consistido en dividir el mástil en 16 dovelas metálicas de aproximadamente 7,30 m de altura más la cabeza. Dichas dovelas se ejecutaron en taller y después se montaron en obra utilizando una grúa Manitowoc 4600, montada sobre ringer para incrementar su capacidad de carga.

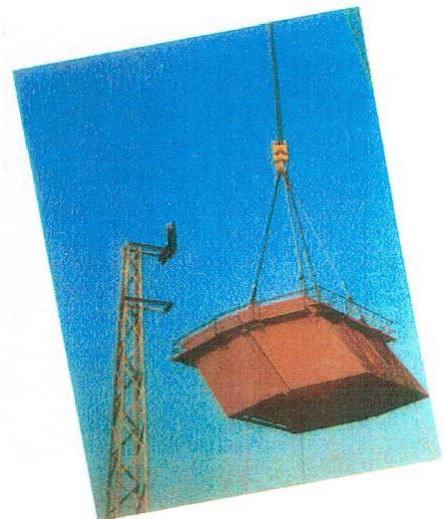


Figura 5.75. Construcción dovelas.

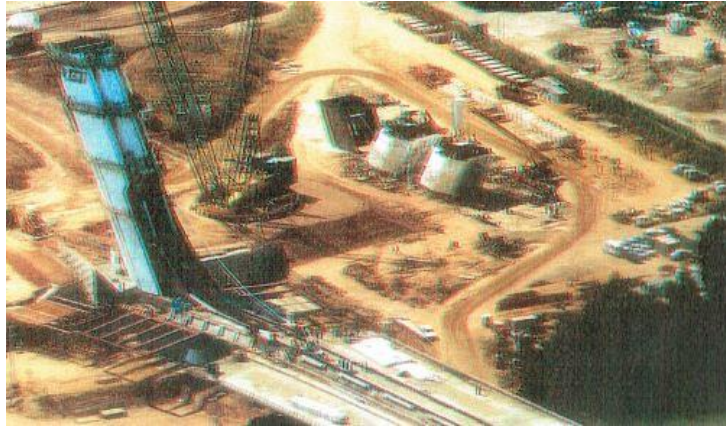


Figura 5.76. Construcción mástil.

En el parque de montaje en obra se incorporaban a la dovela tanto los elementos estructurales (tubo, ferralla, etc) como los elementos auxiliares, es decir, todo lo necesario para las operaciones posteriores de unión de dovelas, hormigonado, izado de cables, etc

La dovela se pintaba antes de su elevación, salvo unas bandas de 50 mm, en las zonas próximas a su unión con la dovela contigua, para evitar la producción de los gases tóxicos que genera la pintura cuando se suelda sobre ella.

La unión entre dovelas metálicas se realizó primero desde dentro, mediante soldadura manual al arco eléctrico con electrodo básico de bajo contenido en hidrógeno y, posteriormente, se procedía, desde fuera, a sanear la raíz y preparar los bordes para soldar nuevamente. La separación entre dovelas, en el momento de la colocación de la dovela superior sobre la ya ejecutada, podía oscilar entre 3.5 y 11 mm.



Figura 5.77. Construcción mástil.

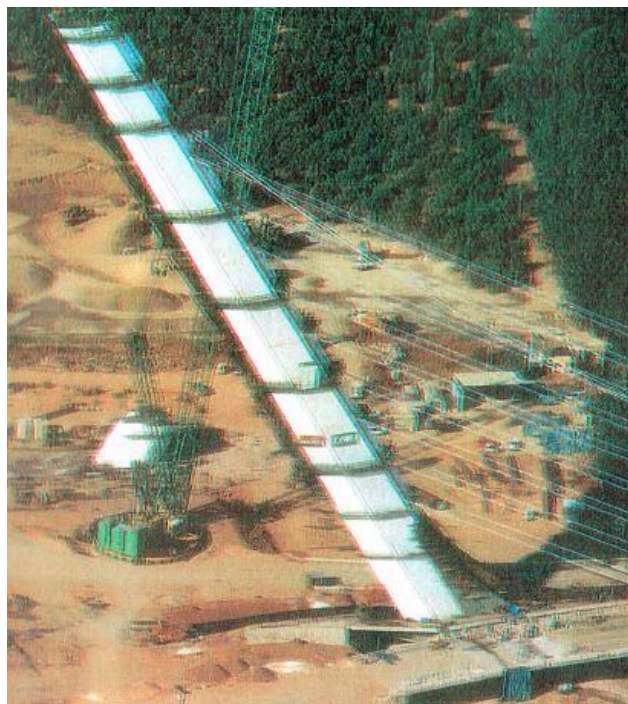


Figura 5.78. Construcción del mástil casi finalizada.

5.3.3. Tirantes

Los tirantes se prefabricaron en obra, cada uno con su longitud previamente calculada, en dos camas de montaje que se situaron sobre el tablero, a ambos lados de la zona peatonal del puente, con el objeto de poder formar, en cada ciclo, la pareja de tirantes correspondiente a la dovela del pilono que se construía en ese momento. Cada cama constituía una pista por donde deslizaban y se situaban los patines hexagonales que servían de apoyo al tirante durante su fabricación. Estos patines tenían las alas superiores abatibles, con objeto de que no estorbasen en el tendido de los torones de las capas inferiores del tirante.

La primera operación a ejecutar consistió en el tendido de los torones sobre los patines, mediante una carretilla que circulaba entre ambas camas. Una vez montados todos los torones del tirante, se colocaban distanciadores cada dos metros, los cuales abrazaban el paquete de torones y lo centraba en el interior de la vaina de polietileno, evitándose que la dañase al producirse los movimientos relativos entre ella y el tirante, como consecuencia de los diferentes coeficientes de dilatación del acero y polietileno.

Tras la operación de tendido de torones se colocaba la vaina que protege al tirante. Esta vaina se suministraba en tramos de 11,75 m que se enhebraban mediante un sistema de vaivén, soldándose mediante un proceso combinado de presión y calor, con previa preparación de los bordes de unión.

Una vez finalizado el montaje de la vaina se procedía a la colocación de las cabezas de anclaje, con sus correspondientes trompetas, separadores de cables, placas de anclaje, cuñas y placas de retención de cuñas, finalizando con la colocación de las cabezas de protección y de tiro.

Al finalizar el montaje del tirante, se procedía al izado del mismo. Para ello, el tirante era arrastrado, suavemente, por el tiro de un cabrestante de 70tm, sobre la propia cama de fabricación, deslizándolo, a continuación, sobre una pista recubierta de teflón, situada sobre el mástil, hasta la altura de la dovela en la que iba a ser anclado. En esta fase, el tirante se situaba en un plano de inclinación diferente del final, por lo que para llevarlo a su situación definitiva, se desenganchó el tiro y, mediante un dispositivo desviador que sujetaba provisionalmente el tirante, se descendía y a la vez se giraba hasta su posición correcta, donde era enganchado nuevamente por el cabrestante, que lo enfilaba, a través del mástil, para llevar la cabeza hasta el lugar de anclaje.

Como última operación en la colocación del tirante, se situaba el anclaje activo en su alojamiento dentro del tubo del tablero, para ello se utilizaba una silla recubierta de teflón, que ayudaba a enfilarlo en la dirección definitiva del tirante.

El tesado de los tirantes se realizaba por debajo del tablero. Para ello se disponía el gato de tesado sobre una deslizadera situada en un bastidor orientable. Una vez marcada la dirección exacta del tiro, el gato se aproximaba hasta la cabeza del anclaje. En esta posición se pasó ya a efectuar el tesado simultáneo de todos los torones del tirante.



Figura 5.79. Colocación tirantes.


CONCLUSIONES


Modelar este puente y viaducto con Catia v5 y no con otros programas 3D tiene diversas ventajas.

Entre ellas, la posibilidad de poder realizar estudios de resistencia y simulaciones dentro del entorno Catia con elementos finitos. Además es posible exportar las geometrías y materiales a programas de análisis como Ansys.

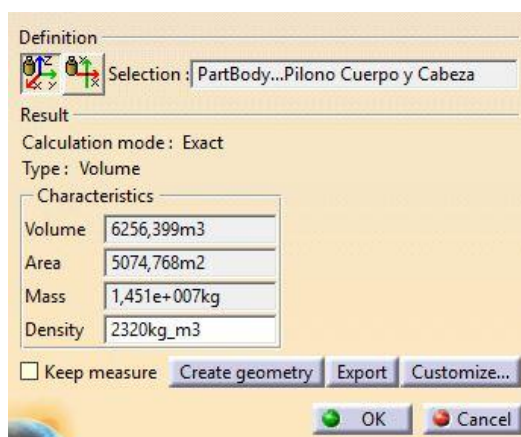
Por ello, este trabajo podría servir como base de otro trabajo fin de grado en el que se quisiera analizar el comportamiento del viaducto y del puente.

Otra ventaja de Catia es que permite calcular el peso de las piezas y por tanto, del conjunto global si

conocemos la densidad de los materiales que componen el modelo . Las densidades, aunque se pueden modificar, se han tomado las que vienen por defecto en Catia al asignar hormigón (concrete) o acero (steel) a cada part. Así, para el hormigón tendrá un valor de 2320 kg/m³ y para el acero de 7860 kg/m³.

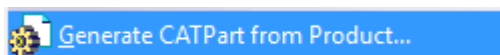
Mediante la herramienta Measure Inertia, , se puede calcular el peso total de cada pieza.

Por ejemplo para el part pilono y la cabeza obtenemos una masa total de $1.451 \cdot 10^4$ toneladas.



También es posible calcular los momentos de inercia y el centro de gravedad.

Otra ventaja que tiene Catia es que permite pasar los archivos modelados a un formato compatible con una impresora 3D. En primer lugar hay que convertir el archivo .CATProduct en .CATPart. Para ello, en el menú tools -> Generate CATPart from Product:



Se genera un archivo .CATPart con el modelo, que permite guardar en formato .stl, que fue el que se necesitó para imprimir en 3D el modelo en la impresora de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] BARRIONUEVO FERRER, Antonio. (2005). *Sevilla. Las formas de crecimiento y construcción de la ciudad*. Sevilla. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

[2] CALATRAVA VALLS, Santiago. (2002). *Conversaciones con estudiantes*. Madrid. Ed. Gustavo Gili

[3] *Catálogo de la Exposición Antológica en la Lonja de Valencia. Santiago Calatrava 1983-93*. (1993). Madrid. Editorial El Croquis.

[4] FABIÁN PUERTA, Verónica (2016). *Modelado y recreación virtual de la máquina bélica “bombarda múltiple” de Leonardo da Vinci*. Proyecto Fin de Carrera. Sevilla. Departamento de Ingeniería Gráfica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

[5] HARBISON, Robert. (1992). *Creatures from the mind of the Engineer*. Zurich and Munich. Verlag für Architektur/ Architectural Publishers. Artemis Verlags A.G.

[6] MARTÍN GARCÍA, Antonio. (1996). *Sevilla (1872-1994), Ciudad y Territorio. De lo local a lo metropolitano*. Tesis. Sevilla. Fundación Cultural Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla

[7] ORTIZ, Isabel; DELGADO, Ana (Dir). (2011). *Santiago Calatrava*. Madrid. Susaeta Ediciones S.A.

[8] Propuesta del *Paso del Alamillo. Camas- San Lázaro II* para el III Premio Internacional Puente de Alcántara. Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Dirección General de Carreteras.

[9] REINOSO SÁNCHEZ, Rafael. (2017). *Modelado y Recreación virtual con CatiaV5 de un clarinete en Si Bemol*. Proyecto Fin de Carrera. Sevilla. Departamento de Ingeniería Gráfica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.

PÁGINAS WEB.

[10] ALVARADO, M.D. (2016). *Lo que la Expo quitó a Sevilla*. ABC DE SEVILLA
http://sevilla.abc.es/sevilla/sevi-expo-quito-sevilla-201605061957_noticia.html

[11] AMENEIRO SÁNCHEZ, Ana. (2017). *Sevilla. Un evento que transformó la ciudad*. Diario de Sevilla.
http://www.diariodesevilla.es/sevilla/evento-transformo-ciudad_0_1128487690.html

- [12] ASOCIACIÓN LEGADO EXPO SEVILLA. (2014). *Derribo simbólico del muro de Torneo*.
<http://www.legadoexposevilla.org/derribo-simbolico-del-muro-de-torneo/>
- [13] ASOCIACIÓN LEGADO EXPO SEVILLA. (2017). *Se inaugura el puente del Alamillo*.
<http://www.legadoexposevilla.org/se-inaugura-el-puente-del-alamillo/>
- [14] AYALA SÖRENSEN, Federico. (2016). *Exposición Iberoamericana de Sevilla 1929. Plaza de España el día de su inauguración, el 9 de mayo*.
<http://www.abc.es/abcfoto/revelado/20160509/abci-revelado0905-201405071556.html>
- [15] AWEITA.PE. *20 estadios más extravagantes del mundo*.
<http://www.aweita.pe/2014-08-13-20-estadios-mas-extravagantes-del-mundo>
- [16] CASTRA IN LUSITANIA. (2014). *Curiosidades callejeras de Sevilla II. La calle Torneo*.
<http://amodelcastillo.blogspot.com.es/>
- [17] CG.CAD,CAM, CAES & GIS. (2005). *PLM solutions used in cathedral construction*.
<http://www.cgweb.co.za/article.aspx?pkarticleid=3378>
- [18] CIENCIA Y CEMENTO. (2010) *El Puente del Alamillo*
<http://wp.cienciaycimento.com/el-puente-del-alamillo/>
- [19] CONSTRUCCIÓN CIVIL. (2014). *Puente Samuel Beckett*
<https://historiacivil.wordpress.com/2014/04/06/puente-samuel-beckett/>
- [20] CORPORACIÓN DE PRÁCTICOS DEL PUERTO DE SEVILLA Y DE LA RÍA DEL GUADALQUIVIR. *Galería*.
<http://sevilla.dnsalias.com/web/galeria.asp?idioma=1>
- [21] DÍAZ LÓPEZ, Víctor. (2016) *Monumento a G.A. Bécquer*.
<https://www.harinadearrozdeclores.com/arquitectura/monumento-a-b%C3%A9cquer-parque-de-mar%C3%ADa-luisa-sevilla/>
- [22] DOMÍNGUEZ ARJONA, Julio. (2006). *Estampas de Sevilla. Una riada en Triana*.
<http://www.galeon.com/juliodominguez/2006b/riatri.html>

[23] DOMÍNGUEZ ARJONA, Julio.(2003). *La Sevilla que no vemos. El Puente de Alfonso XIII. El malquerido Puente de Hierro.*

<http://www.galeon.com/juliodominguez/2003/puhi.html>

[24] DOMÍNGUEZ ARJONA, Julio. (2006). *Estampas de Sevilla. El Puente de SanTelmo. El otro puente levadizo.*

<http://www.galeon.com/juliodominguez/2003/pst.html>

[25] DOMÍNGUEZ ARJONA, Julio. (2007). *Estampas de Sevilla. Estación de Córdoba, estación Plaza de Armas.*

<http://www.galeon.com/juliodominguez/2007/pcordoba.html>

[26] EXPO'92.es. (2017). *La Exposición.*

<http://www.expo92.es/inicio/index.php>

[27] FOTOGRAFÍAS DE SEVILLA. *Pabellón de Brasil de la exposición Iberoamericana de 1929.*

<http://fotografias-sevilla.com/pabellon-brasil.php>

[28] GALLEGO ESPINA, José. (2014). *Sevilla vuelve a mirar a 1929.*

<http://elcorreoweb.es/historico/sevilla-vuelve-a-mirar-a-1929-GKEC598842>

[29] GONZÁLEZ, Roberto. *Foto del emblemático Puente del Alamillo.*

<http://www.minube.com/fotos/rincon/509/7539166>

[30] HISTORY OF INNOVATION. (2007). *2007 Digital Project.*

<https://aehistory.wordpress.com/>

[31] JOT DOWN. (2013). *(Más) puentes españoles singulares.*

<http://www.jotdown.es/2013/03/mas-puentes-espanoles-singulares/>

[32] EL CORREO WEB. *El puente de las delicias se cerrará al tráfico desde el viernes 4 de octubre hasta el miércoles w9*

<http://elcorreoweb.es/historico/el-puente-de-las-delicias-se-cerrara-al-trafico-del-viernes-4-de-octubre-hasta-el-miercoles-9-MBEC529005>

[33] EL MUNDO. ESTÁTICOS EL MUNDO. (2012). *La herencia de la Expo 92*

http://estaticos.elmundo.es/albumes/2012/04/18/herencia_expo_svq/1334776504_extras_albumes_0.jpg

[34] EL VIAJERO INCIDENTAL DE VIAJE POR EL MUNDO. (2014). *El polémico puente Zubizuri.*

<http://viajeroincidental.blogspot.com.es/2014/02/el-polemico-puente-zubizuri.html>

- [35] LA VOZ DE CÁDIZ. (2012). *Paseo al puente del Alamillo. Sevilla*.
<http://objetivocadiz.lavozdigital.es/fotos-logut/paseo-puente-alamillo-sevilla-1087777.html>
- [36] MIARROBA.ES. *Plano de la Exposición de 1929*.
<http://fotos.miarroba.es/menordomo/403-plano-expo-29/in/3-sevilla-historica/>
- [37] PINTEREST.EXPLORA TORRES. *Santiago Calatrava*
<https://es.pinterest.com/pin/241435229997894232/>
- [38] PINTEREST. ESTUDIA LAS ARTES. ARQUITECTURA. *Santiago Calatrava*
<https://es.pinterest.com/pin/313281717809104271/>
- [39] PINTEREST.EXPLORA ARQUITECTURA, MUNDO. *Light Rail Train Bridge*
<https://es.pinterest.com/pin/407294360037201750/>
- [40] PINTEREST.EXPLORA CUERDAS, INGENIEROS. *Puente de Cuerdas*.
<https://es.pinterest.com/pin/400468591844915092/>
- [41] PINTEREST.EXPLORA SAMUEL BECKETT, SANTIAGO CALATRAVA. *Samuel Becket Bridge (Dublín)*
<https://es.pinterest.com/pin/267612402827825377/>
- [42] PLASENCIA, Pedro. (2012). Puentemania. *Puente del Alamillo*.
<http://www.puentemania.com/1687>
- [43] PRICEONOMICS. (2015) *The software behind Frank Gehry's geometrically complex architecture*.
<https://priceonomics.com/the-software-behind-frank-gehrys-geometrically/>
- [44] PUENTEMANÍA. (2011). *Puente de la mujer*.
www.puentemania.com/wp-content/uploads/2011/11/puente-de-la-mujer-santiago-calatrava.jpg
- [45] REISENEWS ON LINE. (2008). *Internationale Biennale in Sevilla*.
<http://www.reisenews-online.de/2008/11/16/internationale-biennale-in-sevilla/>
- [46] SAMPEDRO, Arantxa. (2014). *Mi obra mirada. Puente del cristo de la Expiración*.
<http://miotramirada.com/puente-cristo-expiracion/>

- [47] SEVILLAPEDIA. *Puentes de Sevilla*.
https://sevillapedia.wikanda.es/wiki/Puentes_de_Sevilla
- [48] SEVILLA TQ blogspot
http://sevillatequero.blogspot.com.es/2007_06_01_archive.html
- [49] URBAN NETWORKS.(2014). *Sevilla y el rio Guadalquivir: una relación de amor y odio en diez etapas*.
<http://urban-networks.blogspot.com.es/2014/03/sevilla-y-el-rio-guadalquivir-una.html>
- [50] WIKIARQUITECTURA. *Edificio Ciudad de las Artes y Las Ciencias*.
<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/ciudad-de-las-artes-y-las-ciencias/>
- [51] WIKIARQUITECTURA. *Puente El Zubizuri*.
<http://es.wikiarquitectura.com/edificio/puente-el-zubizuri/>
- [52] WIKIPEDIA. LA ENCICLOPEDIA LIBRE. (2016). *Trencadís*
<https://es.wikipedia.org/wiki/Trencad%C3%ADs>
- [53] WIKIPEDIA. LA ENCICLOPEDIA LIBRE. (2017). *Puente del Alamillo*.
[https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_del_Alamillo_\(Sevilla\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_del_Alamillo_(Sevilla))
- [54] <https://es.slideshare.net/DanielAguilera1/cables-torones-alambres>
- [55] <http://www.cgweb.co.za/article.aspx?pkarticleid=3378>
- [56] <http://janeswalksevilla.com/listing/la-darsena-del-guadalquivir/>
- [57] <http://sevilla-insolita.blogspot.com.es/2014/09/sevilla-se-ve-en-su-rio-y-sus-puentes.html>
- [58] <http://contraquerencia.blogspot.com.es/2012/11/triana-puente-y-aparte-sobre-el-sena.html>

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1 Estadio Olímpico de Pekín, en la realidad y modelizado en Catia, pag. 2
- Figura 1.2. Pilar de la Sagrada Familia, Barcelona modelizado con Catia, pag. 2
- Figura 2.1 Mapa Exposición Iberoamericana de 1929, pag.4
- Figura 2.2 Plaza de España 1929, pag. 5
- Figura 2.3 Pabellón de Brasil 1929, pag. 5
- Figura 2.4 Glorieta de Bécquer, pag. 6
- Figura 2.5. Casino de la exposición 1929, pag. 6
- Figura 2.6. Riada calle Castilla, Triana, pag. 7
- Figura 2.7. Riada Puente de Triana, pag. 7
- Figura 2.8. Tapón de Chapina, pag. 8
- Figura 2.9. Monasterio de la Cartuja siglo XX, pag. 8
- Figura 2.10. Puente de Alfonso XIII, 6 de Abril de 1926, pag. 9
- Figura 2.11. Puente de San Telmo, pag. 9
- Figura 2.12. Puente del Carrousel, París, pag. 10
- Figura 2.13. Puente de Triana, pag. 10
- Figura 2.14. Puente de Los Remedios, pag. 11
- Figura 2.15. Antigua estación de Córdoba, pag. 11
- Figura 2.16. Muro de torneo y su demolición, pag 12
- Figura 2.17. Evolución del río Guadalquivir, desde el siglo XIX hasta 1992, pag. 12
- Figura 2.18. Puente del V Centenario, pag. 13
- Figura 2.19. Puente de las Delicias, pag. 14
- Figura 2.20. Puente del Cristo de la Expiración, pag. 14
- Figura 2.21. Pasarela de la Cartuja, pag 15
- Figura 2.22. Puente de la Barqueta, pag. 15
- Figura 2.23. Modelo inicial del Proyecto, pag. 16
- Figura 2.24. Viaducto del Alamillo, pag. 17
- Figura 2.25. Unión Puente del Alamillo con Viaducto, pag. 17
- Figura 2.26. Estructuras que permite el paso desde el Puente del Alamillo al Viaducto, pag. 18
- Figura 2.27. Puente del Alamillo, pag. 18
- Figura 2.28. Puente del Alamillo, vista desde la zona peatonal, pag. 18
- Figura 2.29. Zona mirador desde el Puente, pag. 19
- Figura 3.1. Boceto preliminar del Puente del Alamillo, Santiago Calatrava, pag. 21
- Figura 3.2. Boceto preliminar y obra L'Hemisfèric, Ciudad de las Artes y las Ciencias, Valencia, pag. 22
- Figura 3.3. “Trencadís”. Izquierda Salamandra Parque Güell, Antonio Gaudí. Derecha Torre de

Comunicaciones de Montjuic, Santiago Calatrava, pag. 22

Figura 3.4. Puente de la Mujer, Argentina, pag. 23

Figura 3.5. Puente de la Mujer, trayectoria del movimiento, pag. 23

Figura 3.6. Puente de la Mujer, momentos antes y después de accionarse, pag. 24

Figura 3.7. Boceto preliminar, Santiago Calatrava, pag. 24

Figura 3.8. Puente Light Rail, Jerusalén, pag. 24

Figura 3.9. Puente Light Rail, Jerusalén, vista general, pag. 25

Figura 3.10. Puente Samuel Beckett, Dublín, pag. 25

Figura 3.11. Puente Samuel Beckett, Dublín, pag. 26

Figura 3.12. Puente Samuel Beckett, girado, pag. 26

Figura 3.13. Alzado frontal y lateral, Puente Campo Volantín, pag. 27

Figura 3.14. Puente Campo Volantín, Bilbao, pag. 28

Figura 3.15. Puente Campo Volantín, Bilbao, pag. 29

Figura 4.1. Sección tipo viaducto, pag. 31

Figura 4.2. Alzado lateral viaducto, pag. 32

Figura 4.3. Sección introducida en Catia , pag. 32

Figura 4.4. Tablero extrusionado, pag. 33

Figura 4.5. Sketch para realizar Pocket de las claraboyas laterales, pag. 33

Figura 4.6. Pocket realizado, pag. 33

Figura 4.7. Sección para el Groove, pag. 34

Figura 4.8. Groove, pag. 34

Figura 4.9. Grooves realizados, pag. 34

Figura 4.10. Óvalo, pag. 35

Figura 4.11. Pad óvalo, pag. 35

Figura 4.12. Vista global, pag. 35

Figura 4.13. Zona de apoyo, pag. 36

Figura 4.14. Sección introducida en Catia pilar, pag.36

Figura 4.15. Pilar, pag. 37

Figura 4.16. Comparación pilar modelado en Catia y en la realidad, pag. 37

Figura 4.17. Contact constraint para poner la pila en su sitio adecuado, pag. 38

Figura 4.18. Simetrías realizadas, pag. 38

Figura 4.19. Vista global 1, pag. 39

Figura 4.20. Vista lateral, pag. 39

Figura 4.21. Viaducto en la realidad, pag. 39

Figura 4.22. Vista interior viaducto, pag. 40

Figura 4.23. Vista interior viaducto 2, pag. 40

Figura 4.24. Vista interior viaducto modelado en Catia, pag. 40

Figura 4.25. Vista interior viaducto 3, pag. 41

Figura 4.26. Vista interior viaducto en Catia, pag. 41

Figura 4.27. Pasarela peatonal en la realidad y en Catia, pag. 41

Figura 4.28. Pila en la realidad y en Catia, pag. 42

Figura 4.29. Pilas en la realidad y en Catia, pag. 42

Figura 4.30. Proceso constructivo de la pila, pag. 44

Figura 4.31. Proceso constructivo pilas y viaducto, pag. 44

Figura 4.32. Proceso constructivo viaducto, pag. 45

Figura 4.33. Proceso constructivo viaducto, cimbra trasladable, pag. 45

Figura 4.34. Trabajos de hormigonado, pag. 46

Figura 4.35. Fase 1 hormigonado, pag. 46

Figura 4.36. Fase 2 hormigonado, pag. 46

Figura 4.37. Viaducto construido, pag. 47

Figura 5.1. Bocetos Calatrava del Puente del Alamillo, pag. 49

Figura 5.2. Puente del Alamillo., pag. 50

Figura 5.3. Puente del Alamillo, pag. 50

Figura 5.4. Sección transversal del tablero, pag. 51

Figura 5.5. Sección horizontal pilono cota $Z=76.15$ m, pag. 51

Figura 5.6. Pilon, pag. 52

Figura 5.7. Secciones horizontales cotas $Z=125.08$ m y $Z=36.00$ m, pag. 52

Figura 5.8. Pilon modelado en Catia pag. 53

Figura 5.9. Cabeza. Multi Section Solid 1, pag. 53

Figura 5.10. Splits cabeza, pag. 54

Figura 5.11. Offset, pag. 54

Figura 5.12. Pocket para vaciar la cabeza, pag. 54

Figura 5.13. Pad parte frontal, pag. 55

Figura 5.14. Splits laterales, pag. 55

Figura 5.15. Pocket 1. Ojos, pag. 56

Figura 5.16. Pocket 2. Ventanas traseras, pag. 56

Figura 5.17. Pocket 3. Huecos inferiores, pag. 56

Figura 5.18. Pocket 4. Ventanas superiores, pag. 56

Figura 5.19. Pad nariz, pag. 57

Figura 5.20. Pad base, pag. 57

Figura 5.21. Rejillas inferiores, pag. 57

Figura 5.22. Rejillas superiores, pag. 58

Figura 5.23. Rejillas del “ojo”, pag. 58

Figura 5.24. Rejillas traseras, pag. 58.

Figura 5.25. Encepado 1, pag. 59

Figura 5.26. Encepado 2, pag. 59

Figura 5.27. Chaflanes, pag. 60

Figura 5.28. Pilotes, pag. 60

Figura 5.29. Pad 1 basamento, pag. 61

Figura 5.30. Pocket 1 basamento, pag. 61

Figura 5.31. Pocket 2 basamento, pag. 61

Figura 5.32. Chaflanes basamento, pag. 62

Figura 5.33. Pocket zona curva, pag 62

Figura 5.34. Pad superior 1, pag. 62

Figura 5.35. Pad superior 2, pag. 63

Figura 5.36. Pad superior 3, pag. 63

Figura 5.37. Pad laterales, pag. 63

Figura 5.38. Pad losa superior, pag. 64

Figura 5.39. Basamento en Catia. Vista global, pag. 64

Figura 5.40. Pad inicial, pag. 65

Figura 5.41. Pad detalles pilono, pag. 65

Figura 5.42. Detalles 2 pilono, pag. 66

Figura 5.43. Puerta trasera en Catia y en la realidad, pag. 66

Figura 5.44. Vista detalle inferior Pilono en Catia y en la realidad, pag. 67

Figura 5.45. Viga central, pag. 68

Figura 5.46. Viga y tablero en Catia, pag. 68

Figura 5.47. Huecos extremos del tablero en Catia y en la realidad, 69

Figura 5.48. Rampa de acceso a la plataforma peatonal desde la rotonda de Torneo, pag. 69

Figura 5.49. Tablero curvo, pag. 79

Figura 5.50. Tableros curvos, pag. 79

Figura 5.51. Torón , pag. 71

Figura 5.52. Tirantes. Unión con pilono, pag. 71

Figura 5.53. Tirantes. Unión con pilono 2, pag. 72

Figura 5.54. Tirantes. Unión con viga central, pag. 72

Figura 5.55. Viga transversal, pag. 73

Figura 5.56. Detalle vigas transversales, pag. 73

Figura 5.57. Vigas transversales en Catia, pag. 74

Figura 5.58. Vigas transversales en Catia y en la realidad, pag. 74

Figura 5.59. Lecho del río, pag. 75

Figura 5.60. Agua del río, pag. 75

Figura 5.61. Puente vista global, pag. 76

Figura 5.62. Puente vista global con la opción Render, pag. 76

Figura 5.63. Puente vista global en Catia y en la realidad 1, pag. 77

Figura 5.64. Puente vista global en Catia y en la realidad 2, pag. 78

Figura 5.65. Puente vista global en Catia y en la realidad 2, pag. 79

Figura 5.66. Puente vista global en Catia y en la realidad 3, pag. 80

Figura 5.67. Puente vista global en Catia y en la realidad 4, pag. 81

Figura 5.68. Puente vista global en Catia y en la realidad 5, pag. 81

Figura 5.69. Escalinatas que bajan desde Torneo en la realidad y en Catia v5, pag. 82

Figura 5.70. Plataforma sobre la que se construyó el puente, pag. 83

Figura 5.71. Construcción del Puente del Alamillo. Colocación de las dovelas, pag. 84

Figura 5.72. Viga central hexagonal, pag. 84

Figura 5.73. Vigas transversales, pag. 84

Figura 5.74. Construcción basamento, pag 85

Figura 5.75. Construcción dovelas, pag. 85

Figura 5.76. Construcción mástil, pag. 86

Figura 5.77. Construcción mástil, pag. 86

Figura 5.78. Construcción del mástil casi finalizada, pag. 87

Figura 5.79. Colocación tirantes, pag. 88

LISTA DE PLANOS

N°	Título	Escala
01	Emplazamiento	1/5000
02	Sección transversal viaducto	1/80
03	Alzado y planta viaducto	1/350
04	Alzado puente	1/600
05	Alzado y perfil pedestal	1/250
06	Pedestal	1/250
07	Mástil	1/400
08	Secciones horizontales mástil	1/100
09	Cabeza pilono	1/100
10	Tablero	1/50
11	Tablero zona basamento	1/60
12	Pilotes	1/150